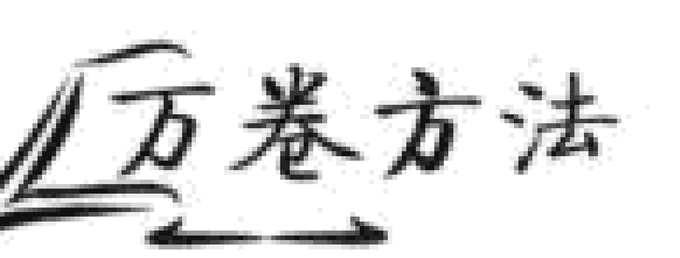


复杂性科学方法及其应用

FUZAXING KEXUE FANGFA JIQI YINGYONG

黄欣荣 著



复杂性科学方法及其应用

FUZAXING KEXUE FANGFA JIQI YINGYONG

黄欣荣 著



重庆大学出版社

内容提要

复杂性科学是系统科学的延伸和发展，被人誉为"21世纪的科学"。本书通过概括、总结复杂性科学五个理论分支，创造性地提出并论述了复杂性科学方法的整体框架，提炼出涌现生成方法、维生适应方法、遗传进化方法、临界突变方法和复杂网络方法五种科学新方法。这些新方法分别论述了组织发展过程中涌现、维持、生长、突变等不同阶段的组织状态，共同解释了复杂组织的生成演化机理，是复杂组织理论的新发展。

图书在版编目(CIP)数据

复杂性科学方法及其应用/黄欣荣著.—重庆：重庆大学出版社，2012.1
(万卷方法)
ISBN 978-7-5624-6293-4

Ⅰ.①复… Ⅱ.①黄… Ⅲ.①复杂性—科学方法论
Ⅳ.①G304

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第150142号

复杂性科学方法及其应用
黄欣荣 著
策划编辑：雷少波
责任编辑：李桂英 廖 可 版式设计：雷少波
责任校对：任卓惠 责任印制：赵 晟
*
重庆大学出版社出版发行
出版人：邓晓益
社址：重庆市沙坪坝区虎溪大学城重庆大学(虎溪校区)
邮编：401331
电话：(023) 88617183 88617185(中小学)
传真：(023) 88617186 88617166
网址：http://www.cqup.com.cn
邮箱：fxk@cqup.com.cn (营销中心)
全国新华书店经销
重庆五环印务有限公司印刷
*
开本：940×1360 1/32 印张：9 字数：258千
2012年1月第1版 2012年1月第1次印刷
印数：1—4 000
ISBN 978-7-5624-6293-4 定价：29.00元

目录

第 一 章

复杂性科学的方法意蕴

复杂性科学是研究复杂系统行为与性质的科学，是系统科学发展的新阶段，被誉为“21 世纪的科学”，并代表着科学发展的新方向。随着复杂性科学的兴起和发展，其影响逐渐越出具体的学科领域，走向了一般的科学方法论的道路，越来越多的研究者将其当作新兴的科学方法运用于诸多的领域。复杂性方法从复杂性理论的各学科分支中发掘、提炼出具有普遍意义的科学方法，并让这些方法构成一个比较和谐、完备的方法体系。复杂性方法是随着复杂性研究兴起而诞生的新兴科学研究方法，主要由涌现生成方法、适应维生方法、遗传进化方法、临界突变方法和复杂网络方法等五种主要的方法构成。这些方法能够比较成功地解释复杂组织兴起、维生、发展等组织演化的各个阶段，是科学研究方法的新发展，并由此丰富了科学方法的理论宝库。复杂性方法可以用于解释复杂系统（特别是有机组织）的生成演化，为揭开各类组织之谜提供方法和工具，是当前复杂性哲学研究的一项具有重要意义的工作。

第一节　复杂性科学与科学方法论

对探索事物复杂性的研究究竟是称为“复杂性科学”还是“复杂性研究”，学术界存在一些争论。例如中国社会科学院的闽家胤赞成使用“复杂性研究”却不赞成使用“复杂性科学”。他认为道理很简单，“复杂性研究”是可能的，“复杂性科学”是不可能的。科学

仅限于研究实体、运动和关系,从未能够为研究一种"属性"建立起一门科学来。譬如"美"是一种属性,人类研究"美"至少几千年了,但美学始终属于哲学而不是科学。我们不应当直接研究"复杂性",而应当直接研究"复杂系统",特别是某一类复杂系统。① 苗东升也认为,复杂性并不是一门新科学,"因为复杂性研究的成果不是在相对论、分子生物学之外又出现的另一门新学科,而是所有学科领域都有自己的复杂性,都需要超越还原论,不可能把这些成果归属于某一门学科,复杂性研究改变的不是个别学科领域,而是几乎所有学科领域,所有学科领域复杂性研究的总和才是所谓'复杂性科学'。这样说还不够,复杂性探索将开辟大量跨学科研究的新领域,它们无法划归某个现有的学科领域,也不会形成单一的学科。"②然而,纵观自然科学文献,大量的科学家却通常都使用"复杂性科学"来指称相关的复杂性研究,并且把混沌、分形以及元胞自动机等理论研究直接称为复杂性科学。我们采用复杂性科学的说法,但并不排斥复杂性研究的称呼。

由于来自数学、自然科学和工程技术等领域以及社会科学领域大致有 50 ~ 60 种各自不同的复杂性的概念,而且目前还没有从这些概念中形成公认的统一的复杂性定义,因此,对复杂性科学的认识也就难于取得统一。正如《复杂》一书的作者沃尔德罗普(M. Waldrop)在其书的开篇中指出的:复杂性科学"这门学科还如此之新,其范围又如此之广,以至于还无人完全知晓如何确切地定义它,甚至还不知道它的边界何在。然而,这正是它的意义之所在。如果说,复杂性科学的研究领域目前尚显得模糊不清,那便是因为这项研究正在试图解答的是一切常规学科范畴无法解答的问题"。③ 目前学界比较倾向于通过方法论来界定复杂性和复杂性科学。例如,钱学森认为:"凡是不能用还原论处理或不宜用还原论方法处理的问题,而要用或宜用新的科学方法处理的问题,都是复

①闵家胤."复杂性研究"和"复杂性科学"[J].哲学动态,2003(3):10.

②苗东升.复杂性研究的现状与展望[J].系统辩证学学报,2001(4):7.

③米歇尔·沃尔德罗普.复杂——诞生于秩序与混沌边缘的科学[M].陈玲,译.北京:三联书店,1997:1.

杂性问题,复杂巨系统就是这类问题”。① 苗东升通过研究方法论定义了简单性问题,他说:“所谓简单性问题,指一切可以用还原论方法解决的问题,已经得到系统、全面、透彻的研究。形成完全成熟的普适方法论和具体方法的体系。新的问题还会出现,但只要循着这条路走就可以解决,至多作一些局部的调整、修正,无须作方法论的变革。”②由此我们可以看出,复杂性问题或非简单性问题就是指不能完全用还原论方法论解决的问题,作为复杂性科学的研究对象的复杂性和复杂系统就是这类问题。

通过研究方法论来界定学科的领域和性质是复杂性科学的重要特色。一般来说,传统学科是以研究对象来划分的,如数学、物理学、化学、生物学、哲学、历史学、社会学、系统科学等都以研究对象来表明各自的研究范围和相互之间的区别。虽然每门学科都有自己独特的研究方法,但它们之间的区别主要在于研究对象,而不在于研究方法。可是,复杂性研究或复杂性科学不是一门具体的科学,而是分散在许多学科中,又是学科互涉的。之所以被称为复杂性科学,是由于它们所持的方法论立场都已经超越了还原论,所使用的研究方法也都已经超出了还原分析方法的界限。正如苗东升所说:“把按照方法论划分的观点贯彻到底,可否将‘简单性科学’改为还原论科学,把‘复杂性科学’改称为涌现性科学?与reductionism 对应,可否造个英文字 emergencism?前者主要探求事物的还原释放性,后者主要探求事物的整体涌现性,代表科学探索的两个不同方向,而非高低、难易之分。”③

虽然我们对复杂性和复杂性科学都没有一个统一的界定,但复杂性科学具有以下一些特点:

(1)它只能通过研究方法论来界定,其度量标尺和框架就是非还原的研究方法论。通过研究方法论来界定或定义复杂性科学及其研究对象,是复杂性科学的重要特征。

(2)它不是一门具体的学科,而是分散在许多学科中,是学科互涉的,从传统的分类学科到现在的交叉学科,从政治、经济、生物

①许国志.系统科学[M].上海:上海科技教育出版社,2000:299.

②③苗东升.复杂性研究的现状与展望[J].系统辩证学学报,2001(4):7.

到语言、大脑、市场、交通，几乎人类生活的每一个角落，甚至很难说清它的边界之所在。之所以被称为复杂性科学，是由于它比较一致的超越还原论的方法论立场。

(3)它力图打破传统学科之间互不往来的界限，寻找各学科之间的相互联系、相互合作的统一机制。

(4)它要力图打破从牛顿力学以来一直统治和主宰世界的线性理论，抛弃还原论适用于所有科学的梦想。

(5)它要创立新的理论框架体系或范式，应用新的思维模式来理解自然界带给我们的问题。

复杂性研究从20世纪末叶兴起，目前在国内外已成为许多学科领域研究的前沿和热点。复杂性的思想源远流长，在中国最早可以追溯到易经中阴阳五行的思想，在西方则最早可以追溯到的“整体不等于部分之和”的思想。经过近代科学家与哲学家的努力，现代科学从多个方向上走向了系统思想和复杂性思维。①

系统科学的先驱者贝塔朗菲于20世纪40年代末已经提出研究复杂性的问题。信息论创始人之一的韦弗尔(W. Weaver)在同一时期提出有组织复杂性和无组织复杂性的划分，把有组织复杂性作为系统科学的研究对象，对其后的科学发展产生了深刻影响。但总的来说，这个时期的复杂性科学尚无实质性进展。在20世纪50—60年代，系统科学获得重要进展的分支是运筹学、控制论、信息论等技术科学，研究对象基本属于简单系统，尚未触及真正的复杂性。20世纪70年代以后，关于简单系统的理论日趋成熟，系统科学才真正转向以复杂性为主要对象、试图建立关于复杂系统的一般理论，如美国的圣菲研究所的复杂适应系统理论，欧洲大陆的自组织理论，中国的开放复杂巨系统理论等。②

复杂性科学的兴起对传统科学产生了重大的影响。它极大地拓展了科学研究的疆域，使科学从线性的、确定的、有序的传统领域扩展到非线性、不确定和无序的领域。传统科学在对自然界及其规律获得科学认识的同时，也给自己划了一个难于跨越的界限，

①颜泽贤，范冬萍，张华夏. 系统科学导论——复杂性探索[M]. 北京：人民出版社，2006：20-32.

②黄欣荣. 复杂性科学与哲学[M]. 北京：中央编译出版社，2007：3-5，151.

并把自己封闭起来。随着复杂性科学的兴起,原来认为不是科学的领域,或者科学难于企及的领域也逐渐纳入了科学研究的范围,科学的目标从原来的追求简单性走向了现在的认识复杂性。如果把科学研究的领域比作海洋,那么复杂性科学的兴起让我们认识到,传统的简单性科学只是科学海洋中的一个个孤岛,围绕着这些孤岛是更加无边无际的复杂性大海。所以,复杂性科学的兴起是科学发展的大事,难怪会被人称为"21 世纪的科学"。

系统科学在其发展的第一阶段,即系统论、信息论和控制论时期,以及第二阶段,即耗散结构理论、协同学、超循环理论等自组织理论时期,除了诞生和发展了一些新的理论之外,最重要的是它们对传统科学方法论提出了重大挑战,并都担当起一般科学方法的功能,形成了被广泛应用的系统分析方法、信息分析方法、反馈分析方法①以及自组织方法体系②。复杂性科学从本质上来说是系统科学的延伸和发展,因此它自然也延续了系统科学早期发展中的这个特点。

复杂性科学也和早期的系统科学一样,涉及新型的跨学科的方法论。虽然人们对"复杂性"概念还缺乏严格一致的定义,但大家都意识到复杂性方法是为弥补长期占统治地位的经典科学之简化方法的不足而产生的。复杂性科学与科学方法论的关联主要表现在三个方面:①复杂性语境中的方法论反思:因为复杂性科学涉及的领域都是传统学科无法解决的问题,也就是说,传统的科学方法论在复杂性领域显得无能为力。因此复杂性科学首先就要从科学方法论上进行突破和革新,特别是要超越已经成为思维定势、占绝对统治地位的还原论,需要寻找新的方法论,以便解决复杂性的问题。复杂性科学在方法论上明确提出超越还原论,采纳融合还原论和整体论的融贯论新视野。②复杂性研究中的方法工具:复杂性科学在突破传统科学方法论的基础上,采用了一些传统科学不甚认可或不常使用的科学方法,如隐喻,有些则在传统科学方法的基础上进行了革新改造,例如模型、数值、计算、虚拟等。这些方

①魏宏森.系统科学方法论导论[M].北京:人民出版社,1983.

②吴彤.自组织方法论研究[M].北京:清华大学出版社,2001.

法在复杂性科学中获得了新的含义,在复杂性科学中发挥了重要的作用,并反过来又丰富了这些科学方法。③复杂性科学中的方法论意蕴:复杂性科学的内容也像系统科学一样,具有方法论的意蕴,本身也可以上升为科学方法,作为研究的工具用于其他学科的研究。复杂性科学的各个理论分支,如复杂适应系统理论(CAS)、涌现生成理论、遗传进化理论、混沌边缘理论、人工生命理论、复杂网络理论中都蕴涵着丰富的方法意蕴。用复杂性的眼光和方法去透视任何一个传统的学科领域,都可能发现传统方法难于采掘的新"矿藏",使得老学科获得新生命。

复杂性科学从目前来说更像是一场思维方式的变革运动。在这场运动中,一切传统学科都要进行复杂性再审视,把用传统的分析还原思维遗漏、丢弃的东西重新筛选一番,从中找出分析还原方法忽视的东西。可以说,在这场复杂性运动中,以新方法论为特色的复杂性光芒照亮了分析还原方法的死角,各门传统学科又焕发了青春。所以,复杂性科学与科学方法论具有密切的联系。从科学方法论的角度来研究复杂性,从哲学的高度探索复杂性科学的方法论,是复杂性科学的重要工作和重要组成部分。

第二节 复杂性方法的研究现状

复杂性方法的研究应该与复杂性科学的发展基本同步。复杂性科学从其诞生之日起,就开始被人当作新的科学方法运用于其他的科学研究中。学者们认识复杂性科学,可能更多是因其作为科学研究新方法的角度和层面。许多学者,特别是哲学社会科学工作者,也许对处于科学前沿的复杂性科学本身没有特别大的兴趣,甚至对其高深的数学、模型等难于真正理解。他们更多是从其对科学方法论的革新与挑战,或者说是它为科学方法提供的新工具来接受、解读复杂性科学的。复杂性科学作为科学的最前沿研究能够引起哲学社会科学工作者的广泛关注和影响,就是因为他们关注到了复杂性科学的方法工具层面。

复杂性科学工作者主要对复杂性科学的具体科学内容感兴

趣，而其他科学工作者虽然注意到了复杂性科学作为科学方法工具的意蕴，并把他们广泛应用于许多研究领域，但他们对科学方法的提升和凝练缺乏兴趣，或者说他们更关注工具的应用，但不太关注方法本身。对复杂性方法本身的探索应该是哲学工作者，特别是科学方法论工作者的任务。

法国哲学家埃德加·莫兰是当代系统地提出复杂性方法的第一人，他追求在人类思想领域里实现一个关于"复杂性范式"的革命。他的复杂性方法主要是用"多样性统一"的概念模式来纠正经典科学的还原论的认识方法，用关于世界基本性质是有序性和无序性统一的观念来批判机械决定论，提出把认识对象加以背景化来反对在封闭系统中追求完满认识，主张整体和部分共同决定系统来修正传统系统观的单纯整体性原则，等等。莫兰提出复杂性思想的标志时间可以定在他发表《迷失的范式：人性研究》一书的1973年。① 随后他在《方法：天然之天性》《方法：思想观念》两部著作中更加系统地阐发了复杂性方法的内涵和应用。但是，莫兰所论述的复杂性方法其实更多的是我们上面所说的哲学和方法论层面的内容，他并没有真正论述和挖掘第三个层面，即能够作为具体的科学研究方法层面的复杂性方法，因此没有真正的可操作性。

成立于1984年的美国圣菲研究所接过了"复杂性科学"的口号，由于它实力雄厚，现在被视为世界复杂性问题研究的中枢。圣菲研究所的研究对象是复杂适应系统，它提出"适应性造就复杂性"，表明它主要研究能够学习的系统在适应环境的过程中自身发生的结构和行为方式从简单到复杂的演变。圣菲研究所一方面构建复杂性科学的核心理论，如复杂适应系统理论（CAS）、涌现生成理论、混沌边缘理论、人工生命理论和遗传进化理论，另一方面，他们把这些理论当做科学的研究分析方法运用于其他研究领域，例如生物、生态、物理、化学、经济、管理、社会、文化等。他们把研究对象当作一个复杂系统，特别是复杂适应系统，然后用复杂性理论进行建模和分析。复杂适应系统的共同特征是，它们能够通过处

---

①陈一壮. 复杂性理论：学方法的第三个梯级[N]. 学习时报，2005-07-04.

理信息从经验中提取有关客观世界规律性的东西作为自己行为的参照,并通过实践活动中的反馈来改进对世界规律性的认识从而改善自己的行为方式。这反映了生物、社会等高级系统的能动的自组织机制。总之,他们不但把复杂性理论当作前沿性的科学理论,更把它们当作能够广泛应用的科学方法来用于各个领域。不过,圣菲研究所的学者们以及其他西方复杂性研究者目前还停留在复杂性理论的建构以及复杂性理论的一般应用上。他们把复杂性理论当作科学方法来运用,但没有把它提升到一般科学方法的层次,没有对科学方法本身进行归纳和提炼,更没有提出复杂性科学的方法体系。

在国内,最早提到复杂性方法的应该是我国著名科学家钱学森。他与戴汝为、于景元等学者一起,提出了开放的复杂巨系统理论,并把它当作一般的科学研究方法运用于诸多领域,并由此提炼出具有一般科学方法意义的综合集成方法,这是对复杂性方法的重要贡献。随着西方的复杂性科学理论的引进和发展,许多学者纷纷把复杂性理论当作新兴的科学方法运用于自然科学、工程技术和社会科学研究中,这从我国最早的复杂性科学论文集中表现出来,全国第一、二届复杂性科学学术研讨会的论文中也明显能够看出来。除了钱学森学派的原创性贡献外,我国对复杂性科学研究的贡献主要就是将西方的复杂性科学的各种理论运用于各个领域,从而扩展了原来的学科领域,或者让旧问题有了新的解答方案。我国哲学工作者特别是科学哲学工作者从哲学的层面或者方法论的层面对复杂性科学进行了比较系统、全面的梳理,特别是成思危、金吾伦、吴彤、颜泽贤、苗东升等学者,都或多或少地涉及过复杂性方法的探索。例如,颜泽贤、范冬萍等在《系统科学导论——复杂性探索》一书的第五篇中,就把复杂性理论运用于组织管理中,并对复杂性方法有所涉及和提升。

但是,我国学者对复杂性科学的方法论探索主要集中在其复杂性理论与科学方法论关联的第一、二层面,更多是停留在一般方法论意义的探索上,其中包括笔者自己的博士论文《复杂性科学的方法论研究》。从本质上来说,复杂性科学是 20 世纪中叶发展起来的以系统论、控制论和信息论为代表的“老三论”以及 20 世纪 70

年代以来发展起来的自组织理论（“新三论”）的继承和发展。清华大学魏宏森教授全面探索了系统论、控制论、信息论的方法论意义，挖掘出人们如今熟悉的“系统方法”“反馈方法”和“黑箱方法”等，为科学方法论提供了丰富的方法工具。清华大学吴彤教授全面总结了自组织理论的方法意蕴，挖掘出内容丰富的自组织方法。但是，目前国内还没有学者像魏宏森教授对老三论的科学方法提炼和吴彤教授对自组织方法的提炼一样，归纳和提升出能够被众多学者直接引用的复杂性方法。目前的状况是，科学哲学工作者所研究的大部分还是一般性的方法论，缺乏可操作性。而那些应用复杂性科学方法的学者则有点像盲人摸象，不了解复杂性科学的全局，更不会去打造和提炼科学工具，而是直接把复杂性理论当作成熟的科学方法，因而造成了复杂性方法应用的自发性和朴素性，缺乏成熟的复杂性科学方法体系。作为系统科学发展第三阶段的复杂性科学，其内容本身也可以上升、提炼为科学方法，为其他科学研究提供新的方法工具，并为我们观察和认识世界提供新视角和新途径。如今复杂性科学取得了令人瞩目的成就，并在其他科学研究领域中得到了广泛的应用，但到目前为止还没有人对复杂性方法本身进行全面的研究，即从复杂性科学内容中提炼出相应的、具有一般方法论意义的方法工具——复杂性方法，并对复杂性方法的结构体系、主要内涵及其适用条件进行系统的总结。因此，在辩证唯物主义的指导下全面总结基于复杂性科学最新成就的复杂性方法体系，在科学和哲学两个方面都具有重要的理论意义和实际价值。它是马克思主义哲学的最新发展，也是科学哲学在现时代的最新反映。

第三节 复杂性方法的主要内容

所谓复杂性方法，就是把复杂性科学从具体的科学理论提升出来，作为具有一般意义的科学方法，用于分析和解决各个领域的问题，也就是说使复杂性科学从具体的科学内容变为科学方法的分析工具。要从复杂性科学中提炼出具有科学方法意蕴的复杂性

方法，第一步是必须搞清楚复杂性科学由哪些具体的理论构成，也就是说复杂性科学究竟有哪些理论分支。

复杂性科学并不是一门学科，而是在复杂性视野下的一群学科，是一群具有复杂性意识和复杂性思维的理论丛林。在被称为“复杂性科学”的群体中，大体包括如下若干理论①：现代系统科学中包括耗散结构理论、协同学、超循环理论、突变论、复杂巨系统理论；非线性科学中的混沌理论、分形理论等；以及通过计算机仿真研究而提出的进化编程、遗传算法、人工生命、元胞自动机。这些可以被视为复杂性科学的内核。目前来看，复杂性的概念和思想已经开始运用于物理科学、生命科学和经济科学等各个领域，甚至在人文社会科学等其他领域也多少有些应用。这些应用可以被视为复杂性科学的研究外围。由于耗散结构、协同学、超循环理论、突变论等被归入自组织理论以及混沌理论和分形理论都已经比较成熟，这些理论已经划人系统科学发展第二阶段的自组织理论。因此，从目前来说构成复杂性科学的核心理论主要有六个：涌现生成理论、复杂适应系统理论、遗传进化理论、自组织临界性理论、人工生命理论、复杂网络理论。② 我们先来看看这些复杂性科学的理论分支给我们提供了什么样的方法工具。

涌现生成理论是美国圣菲研究所的霍兰提出来的一个复杂性理论分支，也是圣菲研究所的研究主题和基本理念。涌现理论其实就是要从科学机理上揭示出涌现是如何产生的，也就是组织的生成问题，它关注复杂性组织产生的机制，关注描述分析组织生成的工具。霍兰通过“受限生成过程”的分析，揭示出低层次的系统行为主体之间通过局域作用向全局作用的转换，行为主体之间的相互适应、进化产生出一种整体的模式，即一个新的层次，变现为一种涌现性质。这些新层次又可以作为“积木”通过相互会聚、受约束生成新的模式，即更高一层的新的系统和性质，由此层层涌现，不仅产生了具有层级的系统，而且表现出进化涌现的新颖性：新事物、新组织层出不穷。复杂性理论能够进一步对隐藏于涌现

①吴彤. 复杂性的科学哲学探究[M]. 呼和浩特：内蒙古人民出版社，2008：11-12，6.
②黄欣荣. 复杂性科学与哲学[M]. 北京：中央编译出版社，2007：3-5，151.

现象中的有关因素进行发掘研究，并正在发展一些必要的工具、方法和构件以促使涌现的过程更清晰、更容易让人理解。因此，涌现生成理论为我们分析复杂组织的生成条件和机制提供了一种新的科学方法，使我们能从科学机理的层面对生命等复杂组织进行生成条件分析。涌现生成理论解决了复杂组织的发生生成问题。

复杂适应系统理论（CAS）也是霍兰提出来的一个复杂性理论分支。它的最基本思想就是“适应性造就复杂性”。我们把系统中的成员称为具有适应性的主体（adaptive agent），简称为主体。所谓具有适应性，就是指它能够与环境以及其他主体进行交互作用。主体在这种持续不断的交互作用的过程中，不断地“学习”或“积累经验”，并且根据学到的经验改变自身的结构和行为方式，整个宏观系统的演变或进化，包括新层次的产生，分化和多样性的出现，新的、聚合而成的、更大的主体的出现等等，都是在这个基础上逐步派生出来的。复杂适应系统理论从主体间的适应性来分析了组织产生之后主体之间是如何组织在一起，并维持这个组织系统的。因此，复杂适应系统理论为我们分析生命等复杂组织的维生机制提供了方法工具。

进化计算是一系列搜索技术，它以进化原理为仿真依据，侧重于算法的研究，主要有四大流派：遗传算法、进化规划、进化策略和遗传编程。这些方法都是基于生物进化的基本思想来设计、控制和优化人工系统，一般将这类计算方法统称为进化计算。进化计算模仿自然遗传进化的过程，通常包括选择、重组或交叉、变异、迁移、并行实现等基本算子。各流派的区别在于实现进化过程中使用基本算子的应用比例或侧重点上有所不同，但它们都是基于自然进化过程的基本计算模型。遗传进化理论主要希望解决复杂组织的进化、发展和机理问题，为我们探索、解决生命组织的发育、发展问题提供了比较有效的方法工具。

自组织临界性和混沌边缘理论都在研究处于临界状态时系统演化的路径和特征。自组织临界性是指一类开放的、动力学的、远离平衡的、由多个单元组成的系统能够通过一个漫长的自组织过程演化到一个临界态，处于临界态的一个微小的局域扰动可能会通过类似“多米诺效应”的机制被放大，其效应可能会延伸到整个

系统,形成一个大的雪崩。临界性的特征为,处于临界态的系统中会出现各种大小的"雪崩"事件,并且"雪崩"的大小(时间尺度和空间尺度)均服从"幂次"分布。自组织临界性理论认为,多种要素相互作用的大系统能够自发地朝临界状态演化:在这种自组织临界状态,一个小的事件会导致一个大事件乃至突变。自组织临界性理论是一种新的观察自然界的方式。其基本立场是,认为自然界总是处于持续的非平衡状态,由于系统内部要素之间的相互作用,它们可以组织成为一种临界稳定的状态,即临界态。从功能机制角度看,相互作用正是系统演化行为的根源。"自组织临界性"成功地解释了包含于千千万万个发生短程相互作用组元中的时空复杂系统的行为特性。按照这一观点,许多复杂系统的行为特性可分为亚临界、临界和超临界三种状态,在正常情况下,这些系统都自然地朝着临界状态进化,然而一旦运行机制发生突变,系统就可能进入超临界状态并持续爆发大规模的"雪崩"现象。自组织临界性概念有助于刻画这种多种要素相互作用的大系统的演化行为。因此,自组织临界性和混沌边缘理论为我们分析复杂系统的状态突变提供了科学的方法工具。

复杂网络理论是复杂性科学的最新理论分支,是刚刚提出并正在探索的新理论,但已经成了复杂性科学的重要组成部分。复杂网络是对复杂系统非常一般的抽象和描述方式,它突出强调了系统结构的拓扑特征。原则上说,任何包含大量组成单元(或子系统)的复杂系统,当我们把构成单元抽象成节点、把单元之间的相互作用抽象为边时,都可以当作复杂网络来研究。复杂网络可以用来描述物种之间的捕食关系,人与人之间的社会关系,词与词之间的语义联系,计算机之间的网络链接,神经元之间的通讯反馈作用,蛋白质之间的相互关系等。复杂网络研究的内容主要包括:网络的几何性质,网络的形成机制,网络演化的统计规律,网络上的模型性质,以及网络的结构稳定性,网络的演化动力学机制等问题。复杂网络理论为我们解剖复杂组织的结构提够了坚实的方法利器。

人工生命是关于显示自然生命系统行为特征的人造系统的学科,它试图以综合方法用计算机和其他人工媒体内的类似生命行

为来补充有关活有机体分析的传统生物科学。通过把经验性的生物学基础拓展到地球上已进化的碳链生命之外，把"我们所知道的生命"定位于更广阔的形象，即"生命的本来面目"，人工生命能对理论生物学做出贡献。人工生命研究怎样通过抽取生物现象中的基本动态规律来理解生命，并且在物理媒体（如计算机）上重建这些现象，使它们成为一种新的实验方式和受控操纵。人工生命把组织视为简单机器的大群体，采用自底向上的综合方法工作。它由在类似生命、全局动态行为中的简单、有可控规则的大量有交互作用的对象组成。人工生命正是用自底向上分布的、局部的行为决定方法论来获得类似生命行为的涌现行为。人工生命运用综合方法以人工的方式合成生命，探索生命存在的可能形式，因此，人工生命理论为我们应用复杂性方法分析组织的生命机理提供了一个特别好的典型案例。

由此可见，复杂性科学的这六个理论分支看起来好像各自为政，其实它们都是以复杂系统为研究对象，从各个层面和阶段对复杂系统进行解剖分析，从而构成了一个以复杂系统为研究对象的学科群。复杂性科学的研究对象均为复杂系统，而复杂系统一般都是具有生命特征的组织，也就是生命组织。从这些理论分支中归纳、提炼，能够提升出一个关系复杂组织起源、维生、生长、演化等各个环节的复杂性科学的方法体系。归纳起来，从复杂性科学中提升复杂性方法可以采取如下研究路径：

（1）从涌现生成理论中提炼出分析复杂组织的涌现和生成，特别是受限生成过程的一般科学方法：涌现生成分析方法；

（2）从复杂适应系统理论中挖掘出一种科学方法：复杂主体适应分析方法，用于分析具有主动性、适应性的复杂系统相互适应、存在和演化的机制；

（3）从遗传算法、进化策略、进化编程、计算复杂性和算法复杂性等学科中提炼出进化计算分析方法，用于分析复杂系统的遗传进化机制，以弥补传统的达尔文进化论解释的缺陷；

（4）从自组织临界性理论（SOC）和混沌边缘理论中提炼出临界突变分析方法用于解释处于混沌边缘的复杂系统状态突变过程；

(5)复杂网络理论是刚刚创立的一套解释无标度网络系统的复杂性理论,我们从中可以提炼出分析各类复杂系统结构特别是拓扑特性的网络分析理论、方法和工具,即复杂网络分析方法;

(6)人工生命研究特别是元胞自动机理论是复杂性方法应用的典型案例,从中我们可以看出人工生命的起源、演化和发展分析处处都是对复杂性方法的灵活应用。

第四节 复杂性方法的研究意义

关于生命组织的起源、生长、演化和维护,是许多学科共同面对的难题,科学家和哲学家曾经为此做了千年努力,但因为在这些复杂的生命组织中,整体不一定等于部分之和,整体与部分的关系变得更加复杂,因此这个复杂性问题一直没有得到真正的解决。

自古以来,人类就常常同整体和部分的关系打交道。我们可以将房子拆成一块块的砖,然后按图纸重新砌起来;机器可以拆成一个个零部件,再装配起来,仍具有原有的功能。然而,有机体、生命组织奇妙的整体性却令人困惑。只要我们将有机体各个部分从整体中相互分离,它就会很快死亡,整体所具有的属性也就不可逆地消失了。古人曾用"灵魂""生命之气"来表达对有机体整体性的敬畏。近代科学兴起之后,解剖学、生理学向人们提供了大量有关生命的知识。但有机体整体大于部分之和仍然是个难解的谜。科学家们很清楚,组成生命系统的砖块和无机界一样,归根到底无非是原子和基本粒子。尽管人类对这些砖块所遵循的运动规律已知道得十分详细,但有机体产生、发育、生长、老化以至死亡的规律却不是物理和化学原理所能解释的。

哲学家早就感到,这里面一定大有奥秘。生物体、人体、社会本质上都是由原子、分子形成的不同层次的组织,但那些无生命的元素一旦形成组织就会产生新的性质。无机物是没有目的的,但生命系统可以自繁殖,具有目的性以及对环境的适应性。组成系统越复杂,行为往往也越高级。人们曾思辨地把组织整体奇妙的特性表达为普遍的哲学原理。然而这至多只做了描述性工作,组

织系统整体性的秘密仍使人迷惑不解。为什么低层次的子系统或元素一旦形成组织，一定会出现原有层次所没有的性质呢？像目的性、适应性、生长发育这些有机体的特性和低层次物质的性质如因果性有什么关系呢？如何研究复杂组织系统运动的规律？

一直到20世纪30年代，问题的答案才开始在地平线上朦胧地出现。①科学家发现，人们认识目的性、适应性、组织层次之间的关系困难重重，很多时候并不是我们缺乏对这些组织足够详细的知识，而是缺少一种新的研究组织系统的方法。一系列带有浓厚哲学和方法论色彩的系统科学学科群开始兴起。贝塔朗菲提出了一般系统论，维纳创立了控制论，申农则发现了信息论。在这些新兴学科提倡的整体方法的指导下，人类对组织系统规律性的研究获得了突飞猛进的发展。20世纪50年代后，有关方法论方面的创造性进展接踵而来，普里高津的耗散结构论、托姆的突变论、哈肯的协同学，组织系统方法论研究出现了群星灿烂的局面。正是在这样的背景下，金观涛先生把这些系统科学在各个方面的成果和种种探索结合起来，形成了研究组织系统产生、发展、演化以及整体和部分关系的新理论。他把这种统一的新方法论称为组织的哲学或整体的哲学。②金先生的这些研究极富启发性，在当时的自然科学背景下达到了最高的哲学提升和创造，为我们树立了很好的典范。但是，系统科学在那时还处于发展的自组织阶段，复杂组织的许多奥秘还没有揭示出来，于是他只好根据当时的自然科学成就，加上他的良好的哲学功夫进行了哲学式的猜想和构思。组织系统内部的许多细节缺乏自然科学的支撑，因此他的关于组织起源、生长和演化的整体哲学颇为大胆和智慧，但在复杂性科学迅速发展的今天看来就有一点黑格尔哲学的味道，理论宏大但缺少科学基础，其中仍存在许多科学理论的缺环。

如今的复杂性科学的发展，为我们在新的自然科学基础上提炼新的组织方法提供了充分的自然科学素材。复杂性方法主要体现在它能够为我们分析组织系统，特别是复杂组织系统，提供新方

---

①②金观涛．整体的哲学——组织的起源、生长和演化[M]．成都：四川人民出版社，1987.

法工具。具体说来，它能够为分析复杂组织的生成演化过程提供分析的手段。复杂性科学，特别是其中的复杂适应系统理论、涌现生成理论、复杂进化理论、混沌边缘理论、人工生命研究以及复杂网络理论等，为填补这些缺环提供了坚实的科学基础，为我们建构比较完备的复杂组织生成演化机制提供了研究的方法工具。

复杂性方法研究在国内外都还没有系统全面地展开，作者在辩证唯物主义的指导下，从科学方法论的角度对具有二十余年发展历程的复杂性理论进行全面的方法提炼，全面总结出能应用于分析各类复杂系统的方法工具，建构一套基于复杂性科学的方法体系，对科学方法论本身是一种重要的丰富和发展，也是复杂性研究的一项重要工作。也就是说，从复杂性理论的各学科分支中发掘、提炼出具有普遍方法意义的内容，并让这些内容构成一个比较和谐、完备的方法体系，用于解释复杂系统（特别是有机组织）的生成演化，为揭开各类组织（如产业组织、管理组织、生命组织等）之谜提供方法工具，这是一项具有重要时代意义的工作。当然，由于复杂性科学的历史还十分短暂，自身的理论体系还没有完全建立，理论之间的关系还没有完全理顺，因此对我们发掘其中的方法论意义带来一定的难度。

第 二 章

涌现生成方法

——复杂组织生成条件分析

涌现生成是极其普遍的现象,但因为对其产生条件和机制没有找到合适的科学解释,于是一直处于哲学和科学的猜想之中。美国学者霍兰通过选择适当的主体作为积木,用计算机程序刻画少数支配主体间相互作用的规则,通过计算机仿真观察该模型的涌现行为,并建立其涌现理论,由此对神秘的涌现生成现象做了比较科学、合理的解释。这些理论不但是构成复杂性科学的一个重要理论分支,同时也为科学方法论的理论宝库提供了新的科学方法,让我们对万事万物的涌现生成有了一套比较科学的解释方案。

第一节 涌现生成理论的兴起

"涌现"已成为当代复杂性科学和哲学研究的一个前沿和热点问题。以研究复杂性著称的美国圣菲研究所已明确提出:"复杂性,实质上就是一门关于涌现的科学……就是如何发现涌现的基本法则。"①甚至将涌现作为一个"圣菲主题"和"圣菲理念"。② 一本著名的国际杂志就取名为"涌现",全称是《涌现:在组织与管理

①米歇尔·沃德罗普.复杂——诞生于秩序与混沌边缘的科学[M].陈玲,译.北京:三联书店,1997:115.

②米歇尔·沃德罗普.复杂——诞生于秩序与混沌边缘的科学[M].陈玲,译.北京:三联书店,1997:342.

中的复杂性论题》,并在其发刊词中特别阐述了"为什么要起用涌现这个刊名"。由此可见,涌现生成理论是复杂性科学的一门重要理论分支。

一、涌现的含义

英语 emergence 是一个名词,它的动词形式为 emerge,是一个不及物动词。其本义是"从液体中浮出(come up out of liguid)",转义为"现出、显现(come in to view)","生成、露出(issue)",引申义为"引起注意或脱颖而出(rise into notice)"等。

从语义学上来说,emerge 来源于拉丁语的 emerge、emersum,拉丁词干 mergere 为 plunge,即"陷入、投入、突入"之意;而前缀 e-为 out of(从……中出来)。从字面理解,emerge 实为"突出"之意。但从这个词的性质来看,却是一个表示结果的词。从内到外、从无到有、从隐蔽到显现都是过程,其结果都是明朗化。在复杂性科学中,有人把这个词译成"突现",也有人译为"涌现"。所强调的自然是其"突发性",即一下子突然冒出来,这个译法可以说是根据其动词来译的。然而 emergence 一词的后缀-ence 的拉丁语原意恰恰是表示涌现是个过程。所以理解 emergence 不仅要注意到其突发性的一面,更重要的是理解突发后显现的状态。①

Emergence 所表示的结果是一个"成"的过程(becoming process)。所谓"成"也是从结果来看的,如果从开始那一端来看,则是"生",因而,"生"与"成"就是 emerge 一词的起点和终点。

"生成"的过程便是"从无到有"的过程。主要表现在于涌现性,由涌现性开始,到现实性结束。涌现性有两重含义:一个是"涌现",即 actualize,指的是"生",即"开始"的意思;一个是由涌现或开始这个动作变成现实(actuality)的"成"的结果。把这两个方面的含义结合起来就是 actualization,即实现过程或生成过程。在亚里士多德那里,这个过程被称为"隐得莱西",即"完满(perfection)"。"生"与"成"便是这个过程的起点和终点。②

①金吾伦.生成哲学[M].保定:河北大学出版社,2000:167.
②金吾伦.生成哲学[M].保定:河北大学出版社,2000:168.

艾什比在1956年出版的《控制论导论》一书中对“涌现”作了如下说明：

> 涌现这一概念从来没有人明确下过定义，但以下例子也许可以作为讨论的基础：①氨是气体，氯化氢也是气体。这两种气体混合在一起，结果得到固体——这是两种反应物原来都没有的性质。②碳、氢、氧几乎都是无味的，但它们的一种特定化合物糖却具有一种甜味，是三者都没有的。③细菌体内20种左右的氨基酸都没有繁殖的性质，但它们合在一起(再加上一些别的物质)之后，却具有了这种性质。[①]

邦格对涌现概念作了如下定义：

> 设 x 为一具有 A 组成的 CA(x) 系统，P 为 x 的属性，则有：
>
> (1)P 是 A 的组合(resultant)(或相对于层次 A 的组合)，当且仅当 X 的每一 A 分量(component)都具有 P。
>
> (2)不然的话，即如果 X 的任一 A 都不具有 P，则 P 是 A 的涌现(或相对于层次 A 的涌现)。[②]

戈德斯坦(Jeffrey Goldstein)认为，涌现是指在复杂系统的自组织过程中涌现出新的、连贯的结构、类型和性质，相对于它们所出自的微观水平的分量和过程，涌现现象被定义为在宏观水平上出现的现象。[③]

卡斯蒂则把“涌现”定义为来自许多参与者的相互作用的整个系统行为，它不能从系统中单个分量的知识中预测甚至“想像”。[④]

“新英格兰复杂系统研究会(NECSI)”在其创办的杂志《涌现：组织与管理中的复杂性问题》中认为：在复杂系统研究中，涌现的概念是用于指似乎不能由系统已经存在的部分及其相互作用充分解释的新的形态、结构与性质的兴起。当系统呈现出以下特征时，

---

①艾什比. 控制论导论[M]. 张理京，译. 北京：科学出版社，1965：111.

②M. 邦格. 科学的唯物主义[M]. 张相伦，郑毓信，译. 上海：上海译文出版社，1989：27.

③金吾伦. 生成哲学[M]. 保定：河北大学出版社，2000：171.

④卡斯蒂. 虚实世界[M]. 王千祥，权利宁，译. 上海：上海科技教育出版社，1998：38.

作为说明性结构的涌现变得日益重要：

（1）当系统的组织，也就是它的整体秩序显得较部分更为重要且与部分不同时；

（2）当部分可以被替换而不同时损害整个系统时；

（3）当新的整体形态或性质相对于已经存在的部分来说是全新的时；这样，涌现的形态似乎不能通过部分预测与推导，也不能还原到那些部分。

“新英格兰复杂系统研究会”在网站中宣称：

> 复杂系统的部分之间有复杂的相互作用，其整体行为不能从部分行为中简单导出。部分不能解释整体行为这一共识导致了许多新的概念与方法论，它们影响了所有的科学与工程领域，并被应用到技术、商业甚至社会政策中去。①

二、涌现研究的历史回顾

现在复杂性科学家和复杂性哲学家在讨论涌现问题时，常常追溯到亚里士多德。亚里士多德是最早提出涌现思想的哲学家，他提出了著名的“整体不等于部分和”的论断，论述了整体有而部分无的一种整体质的产生，这也就是一种涌现行为。他还提出了从 potentiality（潜能性）到 actuality（涌现性）的生成原理。“潜能性”与“涌现性”是一对对应的概念，与之相应的则是 matter（质料）与 form（形式），质料便是潜能性，而形式则是涌现性，把形式加于质料，便是从潜能性达到现实性，即所谓的“成（becoming）”的过程。

在近代，涌现论思想可以追溯到穆勒的两种因果关系学说。穆勒认为，存在两种因果关系，一种是“合成因果关系”，即由同质的原因以合力的原则导致其结果，这个结果等于诸种同质原因分别作用的总和（例如力的合成就是这种情况），这种因果关系由所谓同质定律所支配；另一种因果关系称为“异质效应（heteropathic effect）”，其特征是多因共同作用产生的结果不等于各个原因单独

①金吾伦. 生成哲学[M]. 保定：河北大学出版社，2000：171.

作用的总和,这种因果关系由"异质定律"所支配(例如氢、氧化合成水,水就不是氢、氧分别作用的总和)。①

在进化论中,emergence 指的是"涌现"这个概念,所谓"涌现"就是一种新体系的产生,但却又无法根据先前的条件加以预测或解释。这是 19 世纪中叶美国科学学家 C. H. 刘易斯(C. H. Lewis,1 817—1 878)提出的。他对生成(generation)和涌现这两个概念进行了区分。他认为生成是可以根据其结构成功加以预测的现象,而涌现则是不能预测的现象。前者可以说是一种线性的关系;而后者则是非线性的关系。进化论者把生命看做一部绵延不断的历史,在各个阶段中已出现彻底的形式:①生命的起源;②带细胞核的原生物的起源;③性的再生形成的起源;④出现具备感觉的动物,具有神经系统和原始大脑;⑤出现具备更高理解力的动物,即人。生命的每一种新形式只能按照它自己的程序和原则去理解。这些就是涌现的情况。②

19 世纪末 20 世纪初,涌现主义学派的主要代表人物有亚历山大(S. Alexander,代表作:《时间、空间与神性》1922)、摩根(C. L. Morgan,代表作:《涌现进化论》1923)、布洛德(C. B. Broad,代表作:《大脑及其在自然中的位置》1925)、斯穆兹(J. C. Smuz,代表作:《整体论与进化》1926)。20 世纪初期动物心理学创始人之一的摩根(C. L. Morgen,1852—1936)认为,如果不能证明一种事物并非先前事物产生的结果,就不能称之为涌现。这里他特别强调了事物的因果关系。因而,这是一种决定论的观点。摩根指责 20 世纪早期的法国直觉主义者柏格森(H. Bergoson)的创造进化论(创化论)纯系推测,而涌现进化论才是一种科学的理论。由于遗传学阐明了遗传的作用过程(从而也阐明了进化的各种状况),当生物化学弄清了细胞核的作用时,有些生物学家更加坚信科学的处理只允许分析整体的各部分而不能分析新的类别。因此,他们就集中研究在种内进化中所起的突变作用和自然选择的作用过程(即种与种、类与类之间的变化)。他们甚至还想将这些发现用于推断种外

---

①范冬萍. 突现理论:历史与前沿[J]. 自然辩证法研究,2005(6):6.

②金吾伦. 生成哲学[M]. 保定:河北大学出版社,2000:169.

进化和大群生物的起源。

怀特海(A. H. Whitehead)的机体哲学,由于其中有创造性发展学说,因而是一种涌现哲学。他于1925年发表的《科学与近代世界》(Science and the Modern World),其中表达了这样一种观点,科学只有接受机体哲学或过程哲学的思想才能解释新发展中的新事实和新问题。怀特海的哲学宇宙论认为,自然界是由许多事件综合成的有机体,而这些事件处于川流不息的产生、消灭的不断变化过程之中。各种事件的综合统一生成具有个性、结构和自我创造能力的有机体,从原子到星云、从社会到人都是处于不同等级的有机体。机体的根本特征就是活动,活动表现为过程。过程就是有机体各个因子之间有内在联系的、持续的创造活动,表现为一个机体可以转化为另一个机体,因而整个世界就表现为一种活动的过程。过程的持续性就是活动的结构。而这种结构是进化的,所以自然界是活生生的、有机的。哲学家M.波兰尼(M. Polanyi)的个人知识的学说也是涌现哲学。

20世纪初英国涌现主义学者们以"涌现"为核心概念建构了一个包含世界观、认识论和方法论的连贯的哲学体系。可以说,目前在复杂性科学基础上建立起来的复杂系统涌现论及各哲学学派的基本论点,都可以在英国涌现主义学派中找到相应的观点。或者说,英国涌现主义学派的一些萌芽思想在新涌现论学派中得到进一步发展,而它的一些错误和局限性在新涌现论中得到某种程度的修正。因此,在研究当代新涌现理论时,英国涌现主义学派是不可忽略的。

在过去20年中,系统科学家和哲学家将涌现视为复杂系统的一种性质,并对这种性质的特点和生成原因进行了广泛的讨论。尽管目前尚无统一的定义,但斯泰西(Ralph Stacey)在《组织中的复杂性和创造性》(1996)一书中对涌现的定义颇具代表性。他认为:涌现是复杂系统中的行动者行为的总体模式(global patterns)的产物。这些行动者按照它们自己的局域性的(local)行为规则相互作用着,并不企图达到这个行为的总体模式。在涌现中,总体式样是不能从产生它的局域行为规则中预言到的。换言之,总体模式是不可还原为个体的行为的。可见,这个定义与英国涌现学派的观

点似乎没有原则的区别,但却指明了当代涌现问题研究的主要是复杂系统的涌现。复杂系统涌现论的关键性突破在于对系统层次涌现的起源和机制的探索和揭示。①

在控制论、信息论及一般系统论这些较早的系统科学中,涌现不是研究的重点,因为和当代复杂性理论感兴趣的复杂、非线性和非平衡系统比较,早期系统科学处理的是相对简单的线性和平衡系统,而涌现至少要求系统具有如下特征:①非线性:虽然早期研究者也曾用正负反馈环表达自然界一定程度的非线性特征,但他们的研究中既没有包括"小原因,大结果",也没有对在涌现现象中发现的非线性相互作用进行专门研究。②自组织:虽然早期系统思想家也偶尔使用这个术语,但主要指系统的自律过程,在当代复杂性理论中,自组织是指复杂系统的创造性、自生长与寻求适应性的行为。涌现现象就是产生这种具有适应性的新结构。③超平衡("非平衡"与"远离平衡"有区别,可合称为"超平衡"):早期系统论探索系统如何趋向最后的平衡态(如一般系统论中的"平衡终极性"概念),而复杂性科学对推动涌现产生的"超平衡态"的条件更感兴趣。涌现现象产生的原因之一是远离平衡的条件放大了偶然事件,这也是涌现具有不可预测的特征的关键因素。

20 世纪末,随着复杂性科学、计算机科学、生命科学和认知科学等交叉学科的迅速发展,科学地解释涌现现象成为当代科学研究的一个目标,新的涌现理论发展起来。特别是以圣菲研究所的研究最著名,主要代表人物有霍兰、考夫曼(Kaufman)、朗顿等,其在研究径路上有一个关键性的突破,那就是揭示涌现产生的机制。

在国内,金吾伦对复杂系统生成演化做过比较系统的研究,提出了"生子"的概念,并在批判构成论的基础上比较系统地提出了他的生成论和生成哲学。②

---

①斯泰西. 组织中的复杂性与创造性[M]. 宋学锋,曹庆仁,译. 成都:四川人民出版社,2000:149-171.

②金吾伦. 生成哲学[M]. 保定:河北大学出版社,2000.

三、涌现的基本特性

涌现这个词在中文中本来是一个普通名词，但自从复杂性科学的涌现理论兴起之后，学界就慢慢地把这个普通名词转变为一个刻画组织生成的一个科学新名词。

涌现现象正在被广泛而深入的研究，它的性质也正在被人们逐渐认识。从已有的研究成果中我们知道，不论何种类型的涌现，都具有如下共同的性质①：

第一，复杂系统涌现性表现为全局模式（global pattern）的整体序或宏观序。涌现最基本的特征就是系统具有了其组成部分所不具有的一种整体性质复杂系统，涌现的这种整体性则主要表现为一种全局模式的整体序。复杂系统涌现的这个特征与一般系统涌现的整体特征是一致的，只是在复杂系统中表现得更加突出。邦格在 2003 年重申了他对涌现的定义："所谓 P 是 K 系统的一种涌现性质，简言之就是，P 是 K 系统所具有的其组分或先驱者所不具有的全局性质（global property）"。② 目前，在诸如关联论、人工生命和自组织理论等认识科学和系统科学的各个径路上建立了一种"弱涌现理论"，得到了许多学者的认同。弱涌现理论强调了系统的整体以及共时依随性。因此，在 20 世纪末和 21 世纪初哲学家们纷纷用依随关系来讨论涌现问题。依随涌现论（supervenience emergentism）关注这样一个问题：依随关系强调上一个层次依附于下一个层次，但它也同时强调上一个层次是从下一个层次中涌现出来的，具有与下一个层次不同的"新颖性"，并且从低一个层次的描述中不能推出也不能预言高一个层次的新特性。正像不能从心理现象及其规律中推出道德现象及其规律，也不能从物理现象及其规律推出心理现象及其独特规律一样。可见，涌现性和涌现论与依随性和依随规律是相容的。而弱涌现论与当代弱还原论的径

①范冬萍. 复杂系统的突现与层次[G]//复杂性科学哲学与感知控制论 2006 年国际研讨会论文集，2006：168-169.

②Mario Bunge. Emergence and Convergence[M]. Toronto：University of Toronto press，2003：14-15.

路也是相容的。

第二，复杂系统的涌现性表现为“从简单中生成复杂”的新颖性。新颖性包含两个方面，一是在共时性上，如上所述，表现为组成部分所不具有的一种新性质：整体性。另一方面，从历时性上看，新颖性常常指进化过程中“真正新事物”的范例会一而再、再而三地出现。现已存在的实体可能形成新的组合，产生新的结构，从而形成具有新性质和行为的新实体。复杂系统涌现的新颖性主要是在历时性的意义上，因此，霍兰以“简单中孕育着复杂”阐释了涌现的从简单到复杂的新事物不断生成的基本特征。“少数规则和规律生成了复杂的系统，而且以不断变化的形式引起永恒的新奇和新的涌现现象。”因此，对于复杂系统来说，涌现就是从个体的、简单的行动主体产生出整体的、复杂的新系统的过程。整体性与新颖性是涌现的最基本和显著的特征。

第三，涌现性表现为非迭代模拟的不可推导性和不可预测性。复杂系统的涌现具有不可预测性，研究者不能从微观层次的组成及其行为规则来演绎推出复杂系统的宏观结构或性质。这种不可预测的新颖性是复杂系统的典型特征。复杂性科学研究表明，这种不可推导性或不可预测性主要源于系统的复杂性。例如，柏道(Mark Bedau)认为涌现的这种不可推导性是微观层次大量非线性因果相互作用和语境相关性(context-depentent)的复杂的结果。正是微观层次的这种非线性因果相互作用的聚集和迭代，导致并展示出宏观层次的涌现现象。复杂性科学正是通过建模和计算机模拟，展示这种微观、局部的因果相互作用的聚集和迭代来研究它们是如何产生出宏观现象的。因此，在认识论上涌现是可认识的。在复杂性科学研究中，有学者将这种具体的有限的可推导性称为“非迭代模拟的不可推导性(undervability except by simulation)”。也就是说，对于未来出现的全局性涌现现象，我们不能根据其组成部分及其相互关系的行为规律，加上现时我们可能了解的初始条件，按传统的数学方法，演绎地将它们推导出来。即使现时我们对于这些规律和条件有完备的知识，也不能对长远的未来之结果作出这种推导。所以叫做逻辑上的“长程的(long-wined)”不可推导

性。但由于计算机科学与技术的发展,我们可以采用一种迭代模拟的方法,以高于人类大脑计算速度4万倍的速度将它迭代模拟出来。这不是一种数学分析的演绎方法,而是迭代运用的实验综合方法,简称为模拟方法,所以叫做非迭代模拟不可导出。

第四,涌现性表现为层次之间的一定程度的不可还原性。许多涌现理论都将不可还原性视为涌现的一个强特征,并认为,一个系统或其性质被认为是涌现的,当且仅当它不仅拥有低层次组分及其行为所不具有的性质及行为,而且高层次的性质和行为不能通过还原得到解释,即不能通过从它的低层次的组分及其相互关系的规律和条件的理解中得到完全的解释。复杂系统涌现也表现出一定的不可还原性。首先,复杂系统涌现表现的是宏观层次的独特行为和规律,对低层次具有一种下向因果效应。"所谓下向因果关系原理就是处于层级的低层次的所有过程受到高层次规律的约束,并遵照这些规律行事。"①许多当代哲学家都将下向因果关系视为涌现性的一个典型特征。其次,复杂系统涌现的行为规律需要宏观层次理论解释的自主性。即,即使在原则上从系统的组成部分及其结合方式也无法推出系统S具有性质P,用低层次规律不能完全解释和替代宏观层次规律。涌现的建构(construct)是解释的基础和起点而不是解释的最终结果,涌现解释在认识论上不仅是必需的而且是自主的,不可能被还原解释所代替。

四、涌现研究的三大学派

目前,不同学者从不同的学科背景和研究径路,对涌现的不同侧面进行了深入和细致的研究,形成了各具特色的涌现理论和学派。根据对涌现特征的描述和刻画的强弱,以及各理论的不同诉求,我们将目前的主要涌现理论分为三类:系统层级涌现论、系统进化涌现论、复杂系统涌现论。②

---

①范冬萍.复杂系统的突现与层次[G]//复杂性科学哲学与感知控制论2006年国际研讨会论文集,2006:169.

②范冬萍.突现论的类型及其理论诉求[J].科学技术与辩证法,2005(4):49-53.

（一）系统层级涌现论

涌现论可以说是在机械论与活力论、还原论与反还原论的长期论争中探寻和发展出来的一条中间道路。它抛弃了活力论的活力物质，但是在某种意义上，又保留了不可还原的生命品质和过程。因此，许多涌现理论都将不可还原性视为涌现概念和理论的一个强特征。对于这些涌现论来说，系统的一个性质被认为是涌现的，当且仅当它不仅拥有低层次组分及其行为所不具有的性质及行为，而且高层次的性质和行为不能通过还原得到解释，即，包括在本体论和认识论上的不可还原。我们把这种强调系统层次间具有不可还原性的涌现概念和理论称为系统层级涌现论。主要观点有三条：①涌现性就是系统所具有，而其组成部分所不具有的新性质，即系统在宏观上所表现的整体性；②涌现性是宏观层次所拥有的一种本体上不可还原的、根本的性质；③涌现性是系统整体在解释上的不可还原性。[①]

（二）系统进化涌现论

在系统层级涌现论中，不可还原性包含了某种不可预测性。但系统进化涌现论的核心是关注系统在进化过程中所产生的新性质或新结构的不可预测性，强调的是涌现性或涌现结构产生前后的历时性关系。这种系统进化涌现论，首先排除了所有预成论，然后是强调那些在初次形成之前原则上不可预测的性质，就是涌现性。主要观点是：①涌现性表现为一种进化中的新颖性；②涌现性表现为进化过程中新事物或性质生成的不可预测性。[②]

（三）复杂系统涌现论

复杂性科学对涌现的研究径路有一个关键性的突破：揭示涌现产生的机制。“目前对复杂性的兴趣主要是关注复杂性产生和

---

①范冬萍．突现论的类型及其理论诉求[J]．科学技术与辩证法，2005(4)：50.

②范冬萍．突现论的类型及其理论诉求[J]．科学技术与辩证法，2005(4)：51.

维持的机制,关注描述分析复杂性的工具。”①布鲁塞尔自由大学的学者黑莱恩(F. Heylighen)也指出,“迄今为止,对于什么是涌现性质的描述或什么是涌现存在的条件,都没有满意的理论对此加以解释”。我们需要“从传统的静态的观点,转换到动态的进化的观点来看待它,将‘一种涌现性质是如何表现的’”问题转换为“一种涌现性质是如何产生的问题”。② 我们只有弄清楚了系统中涌现现象的规律,才会真正了解这些复杂系统。在先进计算机工具的帮助下,复杂性科学家对涌现的产生机制进行了深入探索,并对神经网络、人工生命、生态系统等典型的复杂系统的涌现现象进行了模拟研究,试图给涌现现象寻找可操作的描述方法,建立符合现代科学规范的涌现机制模型和理论,从而使涌现成为一个科学概念。然而,如霍兰所说:“像涌现这么复杂的问题,不可能只是服从一种简单的定义,我也无法提供这样的定义。但是,为研究这一问题,我可以提供一些标识。”③的确,在对各种具体的复杂系统的涌现研究中,一些学者概括出关于涌现的共同特征和标识,我们称这些理论为复杂系统涌现论。其主要观点如下:①涌现是复杂系统的一种整体模式、行为或动态结构;②涌现是一个自组织的层次跃迁过程;③涌现具有非迭代模拟的不可推导性或迭代模拟的可推导性;④涌现具有宏观层次解释的自主性。④

这三种涌现论代表了涌现问题研究的主要径路和理论诉求。系统层级涌现论力图从共时性的视角来定义涌现概念,并从本体论和认识论上对系统层级间的不可还原性进行了分析,特别是对高层次所具有的下向因果关系的强化,为心智哲学、认知科学中涌现问题的研究,如意识问题、感受性问题等提供了重要的启示。可见,系统层级涌现论与还原性的物理主义是不相容的。系统进化涌现论则从历时性的视角,强调并探寻了新事物产生的不可预测性的本体论基础,反驳了涌现的虚幻性和临时性观点,为复杂性科

①司马贺.人工科学——复杂性科学面面观[M].上海:上海科技教育出版社,2004:158.
②范冬萍.突现论的类型及其理论诉求[J].科学技术与辩证法,2005(4):51.
③约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹,译.上海:上海科技出版社,2001:4.
④范冬萍.突现论的类型及其理论诉求[J].科学技术与辩证法,2005(4):51-52.

学的涌现研究提供了本体论的支持。复杂系统涌现论则以涌现产生机制为依据，在认识论层面揭示了涌现在(迭代)模拟意义上的可推导性和可预测性，或者说，除了模拟之外的不可推导性；强调了涌现在宏观解释上的基础性和自主性。因此，复杂系统涌现论力图探寻和建立涌现在科学认识和科学解释中的地位和作用，在认识论上坚持的是一种弱涌现论，即涌现现象是可认识和可解释的，在特定的条件和意义上还具有一定程度的可推导性和可预测性。同时，复杂系统涌现论强调涌现解释的自主性，并不完全否定还原解释，认为涌现论与当代弱还原论之间存在着一定的可兼容性。但是，在本体论上，复杂系统涌现论坚持的是世界多元涌现论的观念，即认为世界是具有多元层次结构的和涌现进化的。显然，这种观念与彻底的还原论世界观是不相容的。①

五、涌现机制的当代探索

复杂性科学正从不同的层面揭示复杂系统涌现性产生的机制，为涌现性具有下向因果作用的观点提供了科学的依据。例如，自组织理论的经典的案例：贝纳德滚卷筒、BZ 反应，以及激光的形成，它们之间有一个共同的特点，就是系统大量的微观组分相关联地协同作用。用哈肯的话来说："各个部分像由一只看不见的手在驱动排列；另一方面，正是这些个别系统通过其协同作用，又反过来创造了这只看不见的手，我们把这只能安排一切的看不见的手称为'序参量'。"②具体来说，序参量是为了描述系统整体行为而引进的宏观参量，是系统有序程度的一种量度。

涌现的机理实质上就是实现跨层级，即从局域的、低层次的行为主体到更高层次的整体模式的跨越，涌现机理揭示了复杂系统层次之间的因果关系脉络。③ 复杂适应系统理论正是强调并在计算机上模拟了适应性造就复杂性和涌现性的过程，一旦行动主体

---

①范冬萍.突现论的类型及其理论诉求[J].科学技术与辩证法，2005(4):52-53.

②哈肯.协同学[M].戴鸣钟，译.上海：上海译文出版社，1988:1.

③范冬萍.复杂系统的突现与层次[G]//复杂性科学哲学与感知控制论2006年国际研讨会论文集，2006:170.

之间的相互作用进展到全局性的作用,我们就不能仅将它看作是个体行动者之间的作用,而应看作是高层次的聚合体的作用即高层次实体的作用。适应性是复杂系统的构成部分——行动主体的基本特征,包括了对环境的适应性,或者说环境对行动主体具有一种约束,即下向因果力。因此,下向因果关系是涌现的一个基础特征,是对整体和高层次涌现性的一种具体表达和体现。复杂系统科学中的"序参量"和"吸引子"的概念给下向因果作用原理提供了有力论据与例证。涌现的各种典型特征,如不可还原性、不可预测性等也正是由此而显现出来。

20 世纪末,随着复杂性科学、计算机科学、生命科学和认知科学等交叉学科的迅速发展,涌现研究的径路发生了关键性的转变:以跨学科研究为视野,以计算机模拟为手段,揭示涌现的机理。

英国涌现主义以一种虔诚的态度将涌现看作是一个黑箱,一种不必解释也不可解释的现象。而复杂性科学正是要克服早期涌现论研究的这个局限,揭示涌现产生的机制,这是涌现研究径路的一个关键性转变。经过 20 世纪后半叶系统科学的发展,特别是最近十多年来对混沌、元胞自动机、机遗传算法等的研究,我们对涌现问题的探讨已经可以并且必须进行问题的转换了:从涌现如何表现转变为涌现何以可能,从研究涌现的静态特征转变到研究涌现的动态过程(dynamic process)。只有分析涌现的动力学(dynamics),即分析涌现形成的动态过程,我们才能了解涌现的一些基本特征,从而明白应该如何定义涌现,如何考察涌现的地位与意义。许多系统科学家和复杂性科学都认识到并强调了这一点,如美国系统科学家和人工智能专家西蒙在《人工科学——复杂性面面观》一书中指出,自 20 世纪中叶以来,人们对复杂性和复杂系统的研究有三次大的兴趣波,在目前这一波中,经常与复杂性相联系的词语是混沌、自适应系统、遗传算法和元胞自动机。① 以研究复杂性著称的美国圣菲研究所则明确提出:"复杂性,实质上就是一门关于涌

①司马贺.人工科学——复杂性科学面面观[M].上海:上海科技教育出版社,2004:158.

现的科学。我们面临的挑战，……就是如何发现涌现的基本法则。"[①]他们甚至将涌现作为圣菲的一个主题和理念。因此我们只有弄清楚了系统中涌现现象的规律，才会真正了解这些复杂系统。以圣菲研究所为代表的复杂性研究之所以能使涌现的研究推进到一个新台阶，进行了一种新范式的转换，那是因为，"复杂性理论能够进一步对隐藏于涌现现象中的有关因素进行发掘研究。这就是说，复杂性理论正在发展一些必要的工具、方法和构建体为促使涌现的过程更清晰、更容易让人理解"[②]。计算机技术已经为复杂系统建模、对复杂系统的行为进行模拟开拓了新的可能性。目前，已对神经网络、人工生命、生态系统等典型的复杂系统的涌现现象进行了模拟研究，对涌现现象建立了一些可操作的描述方法，建立了符合现代科学规范的涌现机制模型和理论。可见正是这种新的研究方法和研究路径使"涌现"成为一个科学概念。

复杂性科学揭示，层级或层次(hierachy 或 level)是涌现的结果，是涌现形成一个序列的表现。对于涌现的生成，霍兰提出的"受约束生成机制"揭示，低层次的系统行动主体之间通过局域作用向全局作用的转换、行动主体之间的相互适应性，进化产生出一种整体的模式，即一个新的层次，表现为一种涌现性质。这些新层次又可以作为"积木"通过相互会聚、受约束生成新的模式，即更高一层的新的系统和性质，由此层层涌现，不仅产生了具有层级的系统，而且表现出进化涌现的新颖性：新事物、新组织层出不穷。

第二节　涌现生成理论的主要内容

涌现生成理论虽然经过了漫长时间的发展，但由于涌现的复杂性，目前还没有比较成熟的理论。因为涌现规律难于用传统的

①米歇尔·沃德罗普. 复杂——诞生于秩序与混沌边缘的科学[M]. 陈玲，译. 北京：三联书店，1997：115.

②范冬萍. 复杂系统的突现与层次[G]//复杂性科学哲学与感知控制论2006年国际研讨会论文集，2006：166.

还原论进行还原,因此涌现问题一直披着神秘的外衣,没有纳入真正的科学研究。美国圣菲研究所的科学家霍兰(John Holland)是当今涌现理论研究的大家,对涌现理论进行了比较全面的论述,并以《涌现——从混沌到有序》为题出版了著名的涌现理论的专著①。霍兰从还原论的窠臼中超越出来,找出了一条探索涌现生成的科学路径,并初步建构了涌现生成的基本理论框架。

一、科学研究的两条径路

在科学研究方法论上,一直存在两种相反的方法论,即还原论和整体论,这也是科学研究的两条基本径路。

张世英认为,在哲学史上,粗略地说,有两种追根问底的方式:一个是"主体—客体"结构的追问方式,一个是"人—世界"结构的追问方式②。前者是作为主体的人站在客体以外追问客体的根底,后者是人处于世界万物之中体悟人如何与无穷无尽的万物融为一体。与此相应的认识事物主要有两种维度:纵向维度和横向维度。纵向维度的认识方法是从事物的表面的直接的感性存在还原深入到非时间性的永恒的普遍概念中去。从纵向维度去认识事物的方法其实就是还原论的认识方法。横向维度的认识方法是从事物之间的相互联系中,从在场的东西推想到不在场的东西,它也不是摒弃概念、普遍性,但要求在认识过程中达到了对普遍性和"事理"的认识之后,还要更进而超越在场的"事理"进入不在场的"事理"之中。这也就是一种整体论的认识方法。

复杂性科学的对象是复杂系统。面对复杂系统,我们也要从上面的两种维度去认识,由此也就形成了两种研究径路:一是还原论的径路,它把复杂系统逐渐分解,层层剥开,直到找出认为是组成或影响复杂系统本质的子系统或要素;二是整体论的径路,它首先找到认为是组成复杂系统的要素或子系统,逐渐组装整合,看看能否最后得到我们所需要的复杂系统。在把某一整体作为研究对

①约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹,译.上海:上海科技出版社,2001.
②张世英.新哲学讲演录[M].桂林:广西师范大学出版社,2004:9.

象的情况下，从物质组成和结构方面来看，向下分解形成还原研究方法，向上包容形成整合研究方法。我们用图示的方法来表示复杂性科学的两条径路和两种方法（图2.1①）。

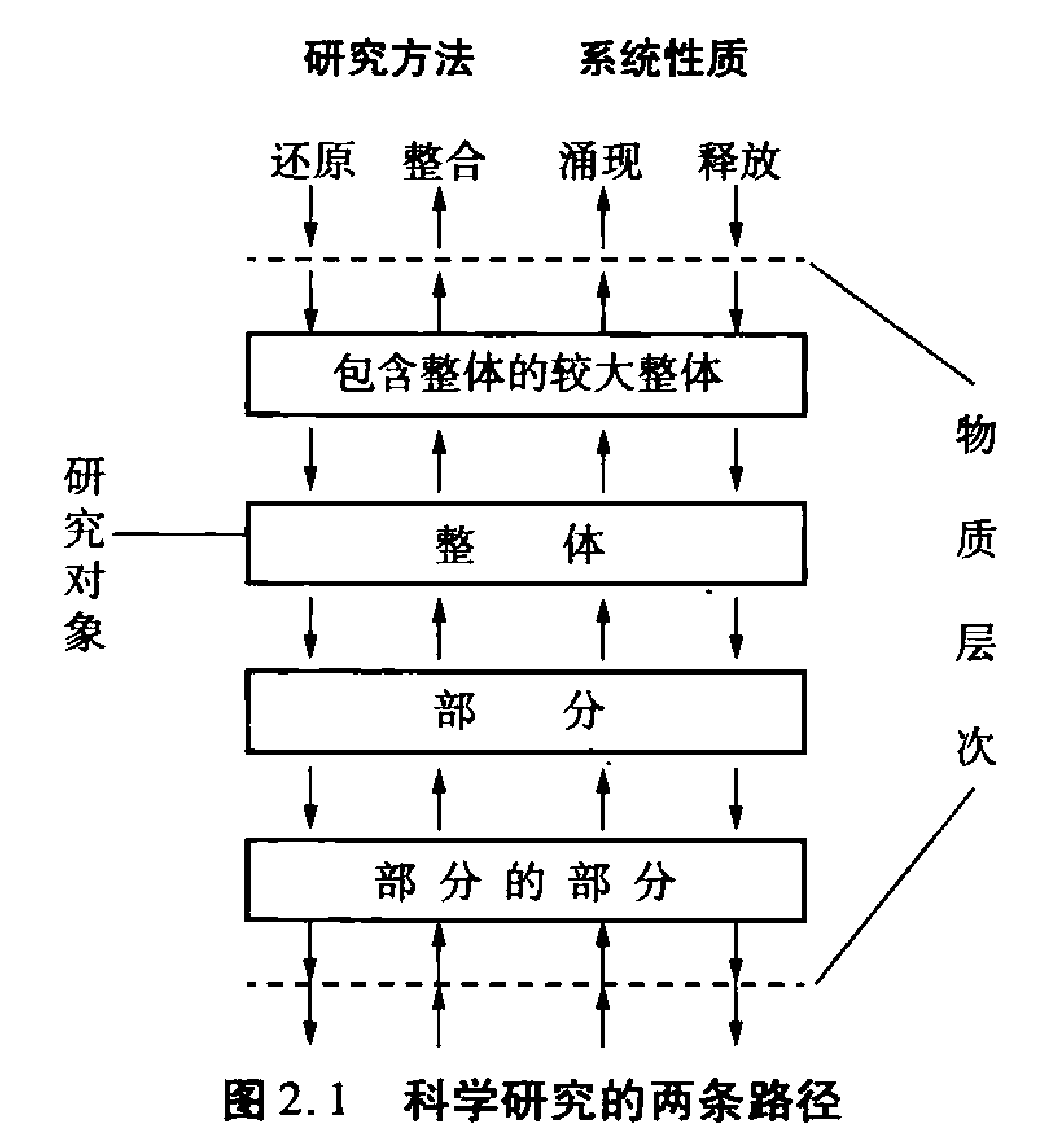


图2.1　科学研究的两条路径

从物质组成来看，整体和部分形成一对相对立的范畴，整体由部分组成，部分由整体分解而来，既没有无整体的部分，也没有无部分的整体。从物质表现出来的性质方面来说，整体具有部分所没有的性质，人们把这种现象称为涌现，整体具有的性质叫做涌现性；同样，虽然部分不具有整体的性质，但部分也具有整体所没有的性质，苗东升把这种现象叫做还原释放，部分具有的性质就叫做释放性。② 从更大范围来看，跨物质层次时，向上跨越就会产生涌现，较高层次具有较低层次所没有的性质；同样，向下跨越时就会出现释放，虽然较低层次不具有较高层次所没有的性质，但较低层次也具有较高层次所没有的性质。

还原论建立在"主体—客体"这样的主客二分的哲学语境中，

①郭元林．复杂性科学知识论[D]．中国社会科学院博士学位论文，2003：29．笔者根据郭元林原图做了适当修改。

②苗东升．论系统思维（三）[J]．系统辩证学学报，2005（1）：4．

是科学认识的重大进步。人们把自己放在主体的位置上，世界万物皆为客体，世界万物在人之外，两者分离、对立，相互外在，只是通过人的主动性、主体性对客体加以认识、征服，才达到主体与客体的统一。作为主体的人通过科学技术等手段进行隔离分割，通过不断的还原过程，寻找事物的同一性、普遍性和不变性，寻找万事万物的基石。通过还原认识的抽象活动，撇开不相同的方面，抽取其共同的、彼此相同之处，构成抽象的普遍性、共同性、统一性和简单性。还原论科学的还原分析方法能够揭示出事物的还原释放性，特别是寻找物质世界的最小组成单元，发现它们独立存在时的特性。所谓还原释放性，指系统组成部分的这样一类属性：如果部分被整合、组织在整体中，它们就会被屏蔽起来，整体地考察系统无法了解这类属性；如果解构系统，把部分从整体中分离出来成为独立存在的对象，这些属性就会释放出来，可以为人们直接考察。例如，氢原子有易燃性，氧原子有助燃性，当它们被整合到水分子内时，这种易燃性和助燃性就被屏蔽起来，只有解构水分子的整体，才能把它们释放出来。原子能、遗传密码等的发现表明，宇宙的许多重大奥秘要靠研究这种还原释放性才能揭示出来。我们从中也可以明显看出这种纵向思维和简单性思维的局限，这也就是还原论和还原方法的局限。

与还原论相反，整体论则在横向维度上，在人与世界万物相通、万物一体的哲学理念上，主体和客体由对立走向融通。横向维度强调天地万物都处于普遍的内在联系之中，都处于相互作用、相互影响、相互勾连之中，这种联系使得每一人、每一物甚至每一人的每一构成部分或每一物的构成部分都成为一个千丝万缕的联系、作用与影响的交叉点。万物一体，万有相通，这是一个千差万别而又彼此融通的世界，一个高度连通的复杂网络。不同的要素相互作用、相互组合，能够产生出原来要素所没有的东西，也就是会涌现出新质，形成涌现现象。这种组合和相互作用，特别能激起人们的兴趣，因为它产生了高度的复杂性和无限的可能性。亿万个原子结合成物质，在一定条件下，这种物质可以从固体转变为液体。数以百万计的人集合在一个国民经济系统中，在一定条件下，

也可以从繁荣走向衰落。更一般地说,无数的个体组织起来,形成了一个动态的、易变的、自适应的系统。

颜泽贤等学者把这两条研究径路形象地称为上向因果和下向因果,并借用"路漫漫其修远兮,吾将上下而求索"这句名言而把追求这两种因果的过程称为"上索"和"下索"。

二、涌现与层次

从上面的两条研究径路中,我们知道,其实在科学研究中,无论是还原方法还是整合方法,都是在寻找不同层次间的各种因果联系,只不过它们寻找的方向不同罢了。还原方法是宏观层面的现象,希望找到微观层面的原因,而整合方法则希望从微观层面出发,找出宏观层面的结果。一个是结果找原因,一个是从原因找结果,但都是在不同层次中实现的。涌现与层次是一个问题的两个可以相互规定的方面。涌现不是同一层次的要素间出现的现象,而是相互作用的部分与涌现出来的整体处于不同层次和不同类型,从而显示出涌现的各种典型特征。①

霍兰认为,我们将复杂系统和涌现看作一个由机械构件和一系列程序组合而成的事物。② 在一定的观察层次中,可持续存在的模式能够成为构成更复杂层次的可持续存在模式的积木块。以手表的构件为例,希腊人知道的杠杆和轮子等基础机械构件是构成手表主发条组件的积木块,而这个组件又是由其他形式相似的小组件组合而成,就像手表指针的传动装置进一步形成复杂的手表系统一样。

在每一个观察层次上,可持续的由前一层次组合而成的模式束缚着后一层次上的涌现模式。这种前后相互牵制的层次关系是有助于我们进行科学研究的一种核心特征(表2.1)。③

①颜泽贤,等.系统科学导论[M].北京:人民出版社,2006:110.
②约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹,译.上海:上海科技出版社,2001:7.
③约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹,译.上海:上海科技出版社,2001:9-10.

表 2.1　科学描述中的层次关系

系统(科学)	典型构件
原子核(物理学)	夸克、胶子
原子(物理学)	质子、中子、电子
气体、液体(物理学) 受限的(如蒸锅中的沸腾) 自由的(如气候)	 PVT(气压/容积/温度) 环流、大气湍流
分子(化学)	键、活化位置、集体行为
细胞器(微生物学)	酶、膜、输运
细胞(生物学)	有丝分裂、减数分裂、基因的行为
组织(生物学)	器官形成(形态发育)
生态系统(生态学)	共生现象、捕食、拟态

这一特征既可以指导我们进行科学还原工作,因为我们可以把对整个系统的解释还原为对组成系统的各个简单部分间相互作用的解释;也可以指导我们进行科学整合工作和对涌现现象的研究,因为我们要处理的涌现现象是出现在由规则控制的系统中的涌现现象。在科学描述中,一个典型的前后相互牵制的层次关系是每一层次上的行为和结构都依赖于在它之前的那一层次上的行为和结构。较低层次的行为和结构可以限制较高层次的行为和结构,并可以帮助我们去认识较高层次的行为和结构。由此可见,层次在复杂性科学中是一个重要的概念,是研究和刻画涌现现象的一个手段。

苗东升认为,涌现概念与层次概念有不可分离的联系,涌现表征层次之间的一种特殊因果关系,他比较详细论述了涌现和层次之间的关系,并由此提出了三级关照原理。① 他认为,从现有文献看,谈论涌现通常涉及两个层次,一个是涌现发生的基础和平台,即相互作用的诸多部分代表的低层次;另一个是涌现的结果,即可以观察到非加和性的高层次。谈论层次也必定涉及涌现,层次划分是涌现的产物,高层次是从低层次涌现出来的,涌现是层次对称

①苗东升. 论涌现[J]. 河池学院学报,2008(1):9-11.

破缺的结果。每个较高层次上的非加和特性都是它下面的层次之间涌现的总结果，但关键是跟它直接相邻的那个低层次，相邻而较低层次上所有事物之间相互作用涌现出相邻而较高层次上的非加和性，至于跟该层次相距较远的那些低层次的关系则是次要的，相距越远关系越少，有些则可以完全不予考虑。具体地说，设系统有多个层次，从低到高顺序记作：k-2、k-1、k、k+1、k+2。欲考察 k 层次上的系统特性，关注的焦点应放在 k-1 层次上的事物，这些事物的相互作用是在 k 层次上看到的整体涌现性赖以产生的直接原因，而 k-2 或更低层次往往关系不大，甚至没有关系。

苗东升举了两个具体的案例。欧阳莹之认为："固体的刚性和液体的湍流涌现于基本粒子难以捉摸的量子态；而刚性和湍流却与基本粒子毫不相干，就像信念和欲望与神经元无关一样。"说"毫不相干"或许有点绝对化，但她的话道出涌现论的重要原理。从基本粒子层次到宏观的固体和液体系统须经过原子、分子等中间层次，多次发生导致层次提升的涌现，即物理性质的多次质变。但刚性和湍流这类系统整体涌现性是直接由分子层次的相互作用中涌现出来的，按照科学方法描述刚性和湍流，从分子的性质（原子层次的整合所产生的涌现性）着手足以解决问题，无须再深入（还原）到原子核甚至基本粒子层次。同样，揭示信念和欲望的本质和形成机制无须还原到神经元层次。①

人体是多层次系统，从细胞算起，至少五个层次；若从生物大分子算起，层次更多。从每个较低层次到跟它相邻的较高层次都有涌现性的产生。人体作为一种系统，健康与否是其宏观整体特性，由脏、腑这些一级子系统相互作用而直接涌现出来。对于一般疾病，如发烧感冒、伤口流血等，欲寻找病因、阐释病理、确定治则治法，往往还原到这一层次就足以解决问题，无须深入到细胞层次，更不必到基因层次。中医就是这样对待问题的，把人体还原到五脏、六腑、奇恒、八脉、筋骨、皮肉等一级子系统，通过望闻问切获取信息，依据这些子系统之间的相生相克关系，即可相当有效地处

①苗东升. 论涌现[J]. 河池学院学报，2008(1)：9-11.

理问题。

不过,仅就上述两个层次谈论涌现往往产生不容忽视的片面性。欲全面了解呈现在 k 层次上的涌现现象,一般还需要顾及高于 k 的 k+1 层次。因为 k+1 层次一旦形成,就对 k 层次上的系统产生特定的约束、限制甚至支配作用,显著影响 k 层次上的涌现性。撇开高层次的作用,就无法全面准确地理解 k 层次上事物的整体涌现性。以治病来说,通常医生谈论的只是人体的生理现象,但人体作为系统在生理层次之上还存在心理层次,心理活动对生理现象有特殊的影响和制约,撇开心理因素仅仅考察生理现象,许多情况下不能正确全面地解决寻找病因、阐释病理、确定治则治法的问题。古代中医已经注意到这一问题,重视同时从生理和心理上诊断和施治。西医长期忽视心理层次,直到近几十年才开始有所扭转。

概括起来说,当你选定了某个系统作为研究对象时,为了认识和处理它的整体涌现性,你必须将目光投向三个层次,一是对象所属的 k 层次,二是与它相邻的低层次 k-1,三是与它相邻的高层次 k+1,将这三个层次联系起来作总体的考虑,以便揭示出对象系统的整体特性是如何涌现出来的(机制或机理),有什么规律性,有哪些必须遵循的原理,进而引出适当的工作方法和程序。一般来说,考虑这三个相邻层次即可解决你所面临的问题,无须顾及低于 k-1 的其他层次和高于 k+1 的其他层次。苗东升将此称为层次研究的三级关照原理。①

涌现现象的研究者常常强调涌现的不可还原性,这样说既有重要意义,又有一定片面性。科学的说法是涌现性是可还原性与不可还原性的统一。没有不可还原性就不成其为涌现,强调这一点乃系统思想的核心观点,十分重要。不可一概否定可还原性,不具有任何可还原性的系统是不存在的。简单系统的涌现也有不可还原的一面,只是非常微弱,可以忽略不计,用还原论方法可以给涌现现象以足够有效的描述。所以,从方法论上区分,可以用还原

①苗东升.论涌现[J].河池学院学报,2008(1):9-11.

论方法基本解决问题的对象是简单系统，还原论方法不足以解决问题的对象，即必须以整体论和还原论辩证统一的系统论方法才能解决问题的对象，即属于复杂系统。

三级关照是层次研究中的一种简化方法，所得出的结论是对真实的整体涌现性的一级近似。在有些情况下，一级近似足以解决问题。在另一些情况下一级近似太粗略，需要进一步“上索”到高于 k+1 的 k+2 层次，甚至更高的层次；同时应该还原（“下索”）到低于 k-1 的 k-2 层次，甚至更深的层次，以求得到二级近似或三级近似。例如，医生看病向上求索到心理层次有时还不够，还需要考虑社会层次的因素对病人的影响。中医自古就有这种思想，现代西医也开始接受这种思想，倡导从单纯的生物医学转变为生物—心理—社会医学。而不能向细胞或更微观的层次还原是中医的重大缺陷。像矫正先天性生理缺陷的问题，只有深入到基因层次才可能真正找到解决办法，西医在这方面极具优势。

给定一个对象，是否所还原到的层次越深，对其整体涌现性的认识就越深刻，问题解决得就越彻底？系统论的回答是否定的。从低层次向高层次的涌现构成一个序列，由于高层次对低层次的制约，对于给定层次上的系统来说，能够直接影响它的是相邻的两个层次，离开该层次越远的其他层次，其影响越小。人的社会性是人作为系统的整体涌现性，需要还原到人的生理、心理、职业、社会交往、文化素养等方面加以考察。人体又是物质系统，相互接触的两个人之间无疑存在万有引力作用，但万有引力对人的社会性这种整体涌现性的形成完全没有作用。钱学森说得好：“从科学的整体来说，彻底的还原论是不可能的，物质结构的层次是无穷的，总还有下一个层次。我们实际都在妥协，还原到适可为止。”他的话揭示出一个重要系统观点，可以称之为层次分析的适可还原法则，或适可下索法原则。非线性的一种常见类型是过犹不及，还原方法的使用中也存在过犹不及，还原不足和还原过头都不利于把握整体涌现性。同理，向上求索也并非层次越多越好，应该适可为止，这可以称为层次分析的适可上索法则。层次分析中的下索与上索都应该适可为止，上索不足与上索过头都不利于把握对象的整体涌现性。

三、刻画涌现的基本概念

宇宙万物都在生成演化之中，万事万物都有涌现生成、演化发展和衰败老化等一系列过程，因此涌现生成的现象是一种普遍现象。小到夸克、胶子，大到宇宙星系，都在不断发生涌现生成的过程。涌现现象虽然普遍，但是对涌现现象的认识和研究却才刚刚开始，而与此相反的下索过程，即对事物和过程的还原研究，却已经有了悠久的历史，并且取得了比较公认的成就。涌现生成的研究为什么到现在还没有取得明显的进展呢？这是因为从研究难度来说，还原和整合的两个过程，即下索和上索这两个过程的难度是不一样的，还原过程相对简单，而整合过程相对复杂，从难度上来说，两者是不对称的。为什么会出现这种情况？下面从状态空间、策略树和复杂性几个关键概念说起。

到目前为止，关于涌现的研究，还没有一个能为大家共同接受的正式框架，所以一些已得到很好定义的技术性概念就成为这个正式框架的基石。霍兰在论述中所遇到的最重要的概念主要有三类：纯数学概念、系统概念、一般的非正式概念。①

（一）纯数学（逻辑）概念

1. 等价类

删去细节用以强调被选定特征的形式化表示。等价类存在于正被研究的具有选定特征的所有对象中。

2. 函数（数学映射）

作为一系列对应关系的形式化表示。这种对应关系对于集合（定义域）中的每个元素赋予另一个集合（值域）中的相应元素与之对应。转换函数作为一个基本概念已成为系统理论的核心概念。

①约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹，译.上海：上海科技出版社，2001：228-230.

3. 生成器集合

这里用来作为规则和规律的形式化表示。它给出元素的初始集合(相应于游戏中的棋子)以及元素组合的合法方式(相应于游戏规则所规定的合法棋局)。这个概念不但是霍兰涌现理论的主题——建模的基础,而且也是将对涌现的讨论与受限生成过程统一起来的普适理论。

4. "如果/则"子句

这里被用来设定所允许的相互作用,特别是主体之间的相互作用。刺激—响应行为——如果[刺激]/则[反应]——提供了使用这个子句最简单的例子。"如果/则"子句是使主体具有可变性,能够有条件地做出反应的核心概念,也正是这个子句使计算机的功能变得非常强大。

(二)系统概念

1. 状态

系统并不在意过去的历史,只要为未来提供的选择是一样的,就视为等同。相应地,需要知道的只是系统当前的状态,以便由此确定未来可能的状态。对于棋类游戏而言,从棋盘上棋子的每一种排列组合到系统的状态,存在一种直接的转换,当然,对于更复杂的系统状态,如神经网络或者物理系统,这种对应就比较难以定义。

当我们研究棋类游戏时,需要有一个从棋盘上棋子的布局到整个游戏状态的直接转换过程。对系统状态的正确定义(无论是游戏、神经网络还是物理学),都应当包含将会影响这个系统未来行为的既往历史的各个方面。这一特征大大简化了研究过程。一个用于涌现研究的普适理论应该将系统的状态定义得简单易懂,就像对游戏的定义一样。

对一盘棋来说,状态仅仅是指在下棋过程中任一时刻棋盘上所有棋子的布局。从这一时刻开始,这盘棋的下法仅仅依赖当时

的棋局,而不是依赖于这个棋局是怎样得到的(在着极少数的例外,如国际象棋中的王车易位,但是这些例外也都可以用一定的办法解决)。简言之,在博弈过程中的任何时刻,博弈的状态是该时刻以前博弈历史的结果,这个结果具有足够的信息以决定将来所有的可能性。在这里,博弈的状态同物理系统的状态关系十分密切。例如,我们记录下装在容器(如车胎)内一定压力下气体的状态,包括压力、温度和体积。如果这时在容器上刺一个洞,下一步所发生的事将完全取决于上面所记录的状态。当一个系统状态被确切定义后,将来的动态变化过程仅仅依赖于它当前的状态。

棋类游戏中的状态空间指的是,在游戏规则的限定下,棋盘上所有允许出现的棋局(棋盘上所有棋子的分布状况)的一个集合(图2.2)。[①] 其中,"在一定规则允许下"这个限制条件是很重要的(图2.3)。[②] 在国际象棋中,棋子被放置在棋盘上的方式是多种多样的,但在游戏规则限定下只有一小部分的棋局是允许的。例如,游戏规则要求,国际象棋里的"象"总是从其开始所在的方框移到具有同一颜色的方框中(它只能在棋盘上沿对角方向移动);而且,给定一方的两个"象"开始时处于不同颜色的方框中。根据这两条规则我们马上就可以知道,任何情况下,同一方的两个"象"在同一颜色方框中出现的状态都是不符合规则的。另外,每一次游戏开始,棋子都是按照指定的规则布置的;当棋子按照既定规则重新布局后——往往只是一步棋的移动,状态就发生了变化,连续的移动就决定了游戏的进行过程。这些在既定规则下得到的一系列棋局(状态);就是博弈的状态空间(图2.4)。[③]

《列子》里有一个"歧路亡羊"的故事,说的是我国战国时期的著名哲学家杨朱,听说邻居走失了一只羊,许多人外出寻找都没有找回来。杨朱问邻居是怎么回事,邻居说:"岔路太多了,而且岔路之中又有岔路,不知道它到底跑到哪条路上去了。"杨朱听了很有感触:"歧路之中,又有歧焉。"[④]其实杨朱这里所感叹的正是状态空

---

①约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹,译.上海:上海科学技术出版社,2006:37.
②③约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹,译.上海:上海科学技术出版社,2006:38.
④金观涛,华国凡.控制论与科学方法论[M].北京:新星出版社,2005:4.

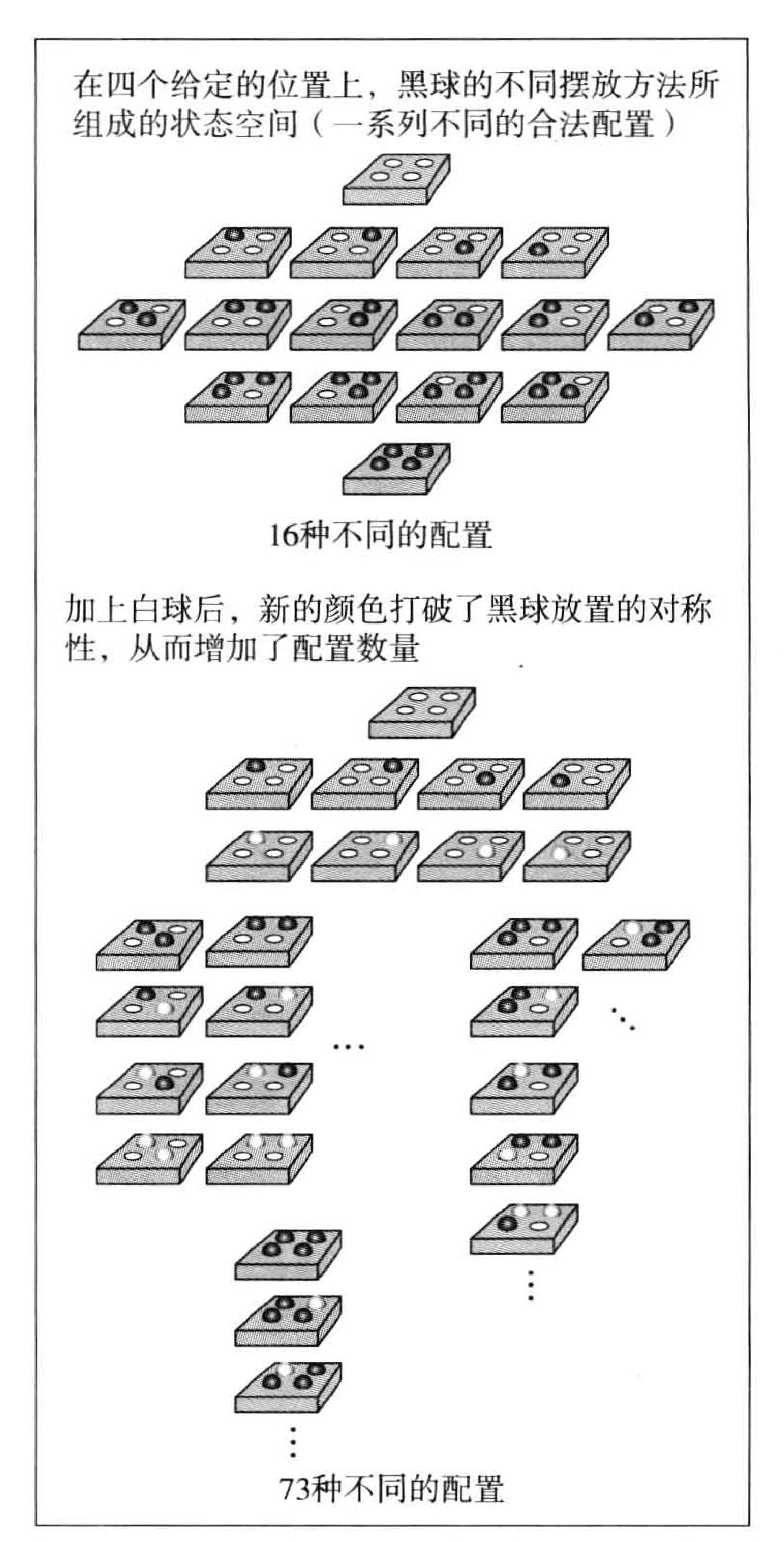


图 2.2　一些简单的状态空间

间和遍历树及其复杂性问题。

所谓的状态是指一个系统在某一时刻的行为参数，而状态空间是指事物发展变化过程中所面临的各种可能状态的集合，也有人把它称为可能性空间。① 任何事物都有它一定的可能性空间，但这些状态只是一些可能性，至于事物具体发展成为可能性空间的

①金观涛，华国凡. 控制论与科学方法论[M]. 北京：新星出版社，2005：3.

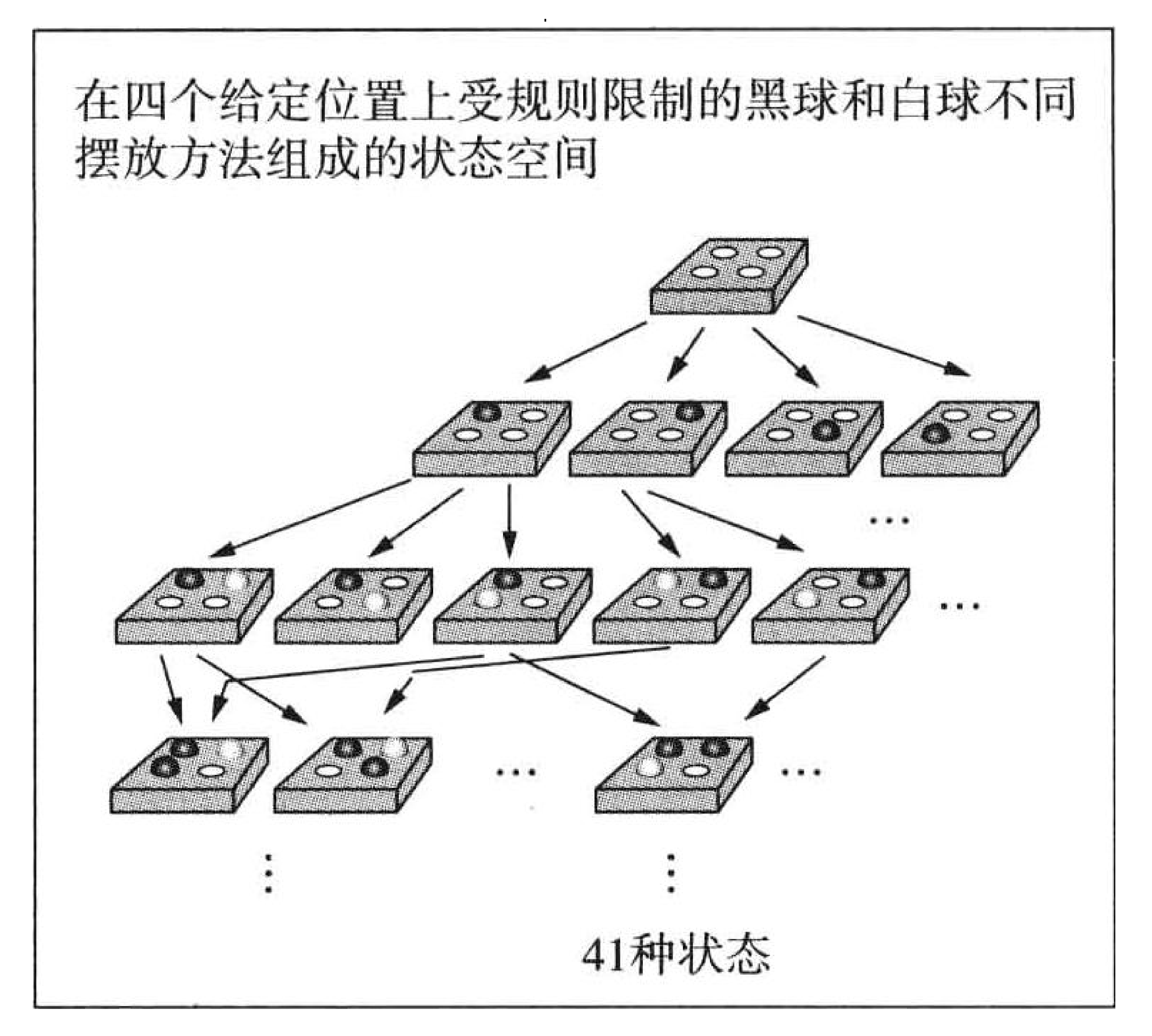


图 2.3　合法的配置

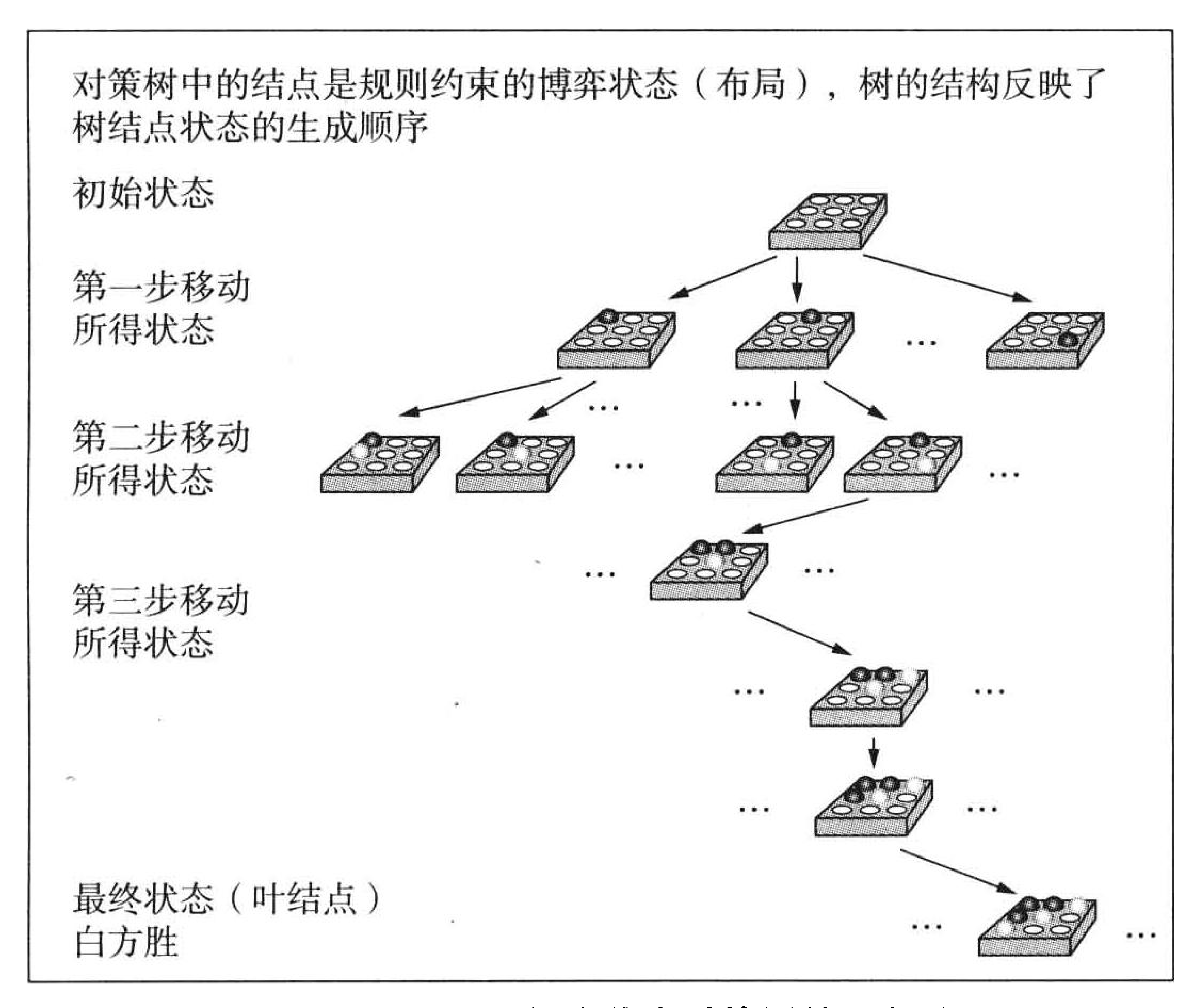


图 2.4　九宫格占地游戏对策树的一部分

哪一个状态，要看条件而定。例如，鸡蛋孵化小鸡，它下一时刻面临的就是活鸡、死鸡或者鸡蛋等可能性。因此任何事物发展过程中的可能性空间就像树枝一样向无限远处伸展开去。生物学家常用生命之树来表达生物的进化过程，这种生命之树正是物种在其

发展过程中按可能性空间展开的形象体现。①

2. 遍历树

对策论最重要的概念就是遍历树(图 2.4)。② 树的根结点是博弈的初始状态,第一层分枝通向的是那些从树的根结点所表示的状态进行一步博弈动作后所能得到的所有状态,在第一层结点上的分枝(第二层分枝)是通向那些从树的根结点所表示的状态进行两步博弈动作后所能得到的状态,如此依次向下直到树的叶结点,树的叶结点表示博弈的最终状态。正是大量从根结点到叶结点的不同连续路径,使得博弈过程丰富而有趣。

相对于那些专门为理论研究而发明的博弈方法,真正的棋类游戏的结果总是比树更加复杂。在博弈中,不同的分枝可能结束于同一个状态,于是可能会有比分枝更少的状态,这同传统的树的概念是不同的。在国际象棋中,如果我们先移一步"车",然后再移一步"象",可能会得到与先移一步"象",再移一步"车"完全相同的棋局。在特殊情况下,很多分枝可能通向同一个叶结点(最终状态)。在国际象棋中,许多不同的对弈序列都能以同一方式结束,如国王在角落里被对方的王后和"车"围攻而死。这种附加的复杂性,对我们目前的讨论影响并不是特别大,但是为了显示这种特性,我们将讨论"博弈进行过程中的多种选择方法",而不是讨论博弈的最终结果,即叶结点。

总而言之,真正的博弈要比传统的树更加错综复杂。即使分枝规则很简单,但叶结点(最终状态)的数量仍会很快增长。事实上,正是由于这种复杂性,才使得博弈不可预测、魅力十足。设想一个包括最初配置的,从任一个配置(状态)开始,只有 10 种可能的移动方式(分枝)的棋类游戏。如果这个博弈在两次移动之后结束,那么就会有 $10^2 = 100$ 种不同的方式:如果博弈在 10 次移动之后结束,那么就会产生 $10^{10} = 10\ 000\ 000\ 000$ 种不同的方式。如果

①金观涛,华国凡. 控制论与科学方法论[M]. 北京:新星出版社,2005:4.

②约翰·H. 霍兰. 涌现——从混沌到有序[M]. 陈禹,译. 上海:上海科技出版社,2001:39.

以同国际象棋大致相当的步数(大约 50 步)结束博弈,就会产生10^{50}种不同的博弈进行方式,这个数字已经远远超过了组成我们地球的所有原子的个数。

现在我们开始认识到,只用少量的规则就可以定义一种博弈,这种博弈是相当错综复杂的,以至于我们不可能详尽阐述它的所有可能性。如果我们把若干世纪以来进行过的所有国际象棋对弈的棋局都记录下来,也不能确定能否从中找到两个完全相同的移动序列(不考虑那些过早结束或经过深思熟虑、经过评注后再重新比赛的对弈)。正是这种永恒的新奇,使得诸如国际象棋和围棋这类经典的博弈,在经过了几个世纪的仔细研究之后,仍能不断地向人类提出新挑战。同样道理,九宫格占地游戏之所以只能作为小孩子的游戏,正是因为一旦认识它的确定模式后,就会很快预测出它的所有可能性。

3. 转换函数

转换函数(也叫对策树)将所有合法的"状态"以及输入(输入信号,所使用的力,或其他类似的)都作为自变量(定义域)。其中每一个状态都被指定了下一个状态。游戏中所有可能的动作序列的树形结构(对策树)是关于转换函数的简单例子。国际象棋和纸牌存在明显的差别,但对策树的出现使我们对它们的研究能够统一起来。

转换函数把对大量游戏的研究统一起来,这些游戏可以是有明显区别的,如国际象棋和纸牌游戏。对策树对把策略确切定义为极小极大原理提供了理论基础;它还是塞缪尔在发展他的展望程序时所使用的概念工具的主要组成部分。这个普适理论必须为研究其他带有涌现现象的系统提供类似的工具。

转换函数(对策树)通过比较少的一系列规则含蓄地加以确定。对涌现的研究是与这样一种能力密切联系的,即用比较少的一系列规则,去确定较大的复杂领域的能力。除了游戏和神经网络外,霍兰还提到过欧几里得几何、牛顿定律和麦克斯韦方程这些也是由简单规则控制的模型。这样的模型,尽管定义很简单,但是即使经过很长一段时间的仔细研究后,它们仍然足够复杂到能使

我们对其产生很多新的理解。

4. 策略

当系统中存在影响状态序列的输入，而且各种不同的状态之间存在优劣差别（比如，根据期望来判断）时，就存在策略的问题。[①]对于转换函数定义域中的每种状态，当系统已设定一个特定输入值时（例如，游戏中的每个参与者都选择了一步走法），也就确定了对应的策略。也就是说，策略是由映射到系统输入值集合状态的函数决定的。如果系统有多个输入（例如，游戏中每个参与者都有一个输入），而针对每一个输入都选择一个策略，那么对于任何初始状态，给定输入时得到的状态序列（状态轨迹）都是一样的。例如在国际象棋中，如果对弈的双方都完全掌握所有的策略，那么对弈的最终结果也是确定的。事实上，对于复杂系统而言，几乎不可能完全决定系统中所有的策略，因为可能的选择太多了，不过这样的概念有助于将游戏和系统这样不同领域的事物统一起来。

在任何一个复杂的博弈中，对弈计划或者说策略，对于有效的博弈都是至关重要的。大致说来，策略就是这样一种规定，它告诉我们如何随着博弈的展开而采取相应的行动，确定出一个决策序列。对策树为策略的表达提供了精确的方法。在博弈的进行过程中，所作的决策序列在对策树上留下一条路径（图 2.5）。[②] 这样，根据决策序列在对策树上选定的分支，我们就能够定义出策略。在对策论中，一种完全策略为每一个可能遇到的状态（棋盘上棋子的布局）指定了一个分支（移动）。换句话说，一个完全策略将能够告诉我们在任何可能的情况下所应当采取的行动。需要注意的是，策略有好有坏。它仅仅是一些指令，指定应该采取的行动；它也可能是导致失败的罪魁祸首。

函数在这个领域里也是大有作为的。我们可以使用函数在博弈状态和策略所确定的移动之间建立对应关系。函数首先为初始状态指定一步移动（譬如，“把从左数第四个兵向前一步”）；然后，

①约翰·H. 霍兰. 涌现——从混沌到有序[M]. 陈禹，译. 上海：上海科技出版社，2001：40-42.

②约翰·H. 霍兰. 涌现——从混沌到有序[M]. 陈禹，译. 上海：上海科学技术出版社，2006：41.

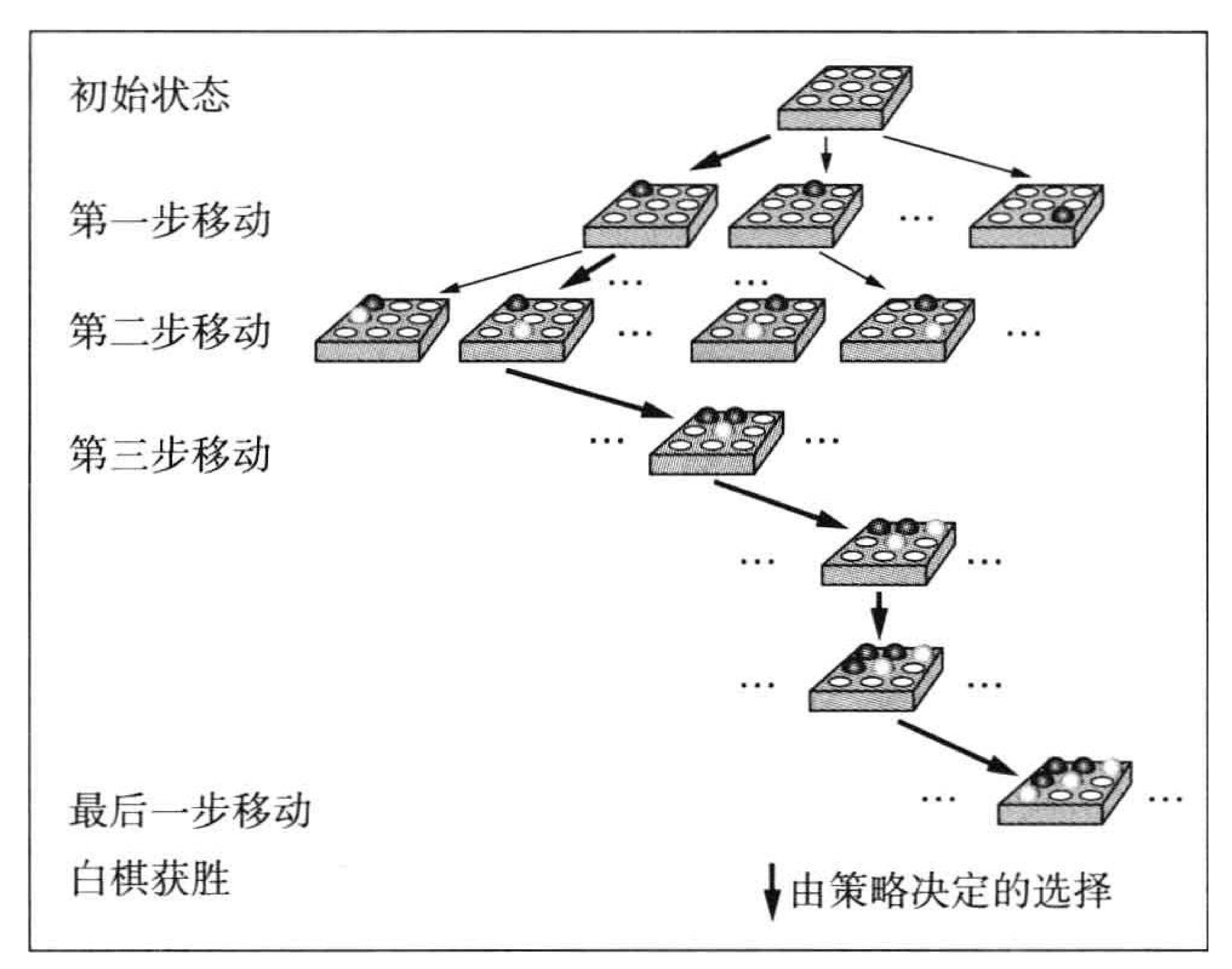


图 2.5 九宫格占地游戏中,相应策略在对策树上确定的一条路径

在对手随之作出反应之后,函数为此时的状态确定相应的移动,以此类推,直至这一局终结。对于每一个策略来说,都存在着描述这个策略的函数。

在两人或多人博弈中,我们分别为每个博弈者确定策略,即所谓的联合策略。一旦对弈各方都固定自己的策略,结果(对策树的叶结点)便随之被确定下来(这里没有考虑随机选择确定的策略,比如说通过掷骰子确定策略)。换句话说,联合策略在遍历树上选定一条路径,这条路径从根结点延伸到某一特定的叶结点。

如果博弈者从一开始就确定对弈策略,那么博弈的精彩和吸引力也就荡然无存,只剩下一种机械的对抗,直至获得已经预定的结果。但是,这个推理过程忽略了一个因素,即博弈中的任何一方都不知道对手的策略。每个参与者都可以预先作好准备,决定如何应对即将出现的种种意外情况,但由于对手行动的复杂多变,他们无法知道将会出现怎样的意外。因此,单个参与者是无法预测出最终结果的,哪怕是开始几步之后的情况,甚至在最初的结果已经预定的情况下也是如此。对于每一个对弈者而言,博弈过程将会展现出无法预料的曲折和坎坷。

当不断重复同一个博弈时,关于对手策略原先未知的部分会逐渐变得清晰起来。以一个两人博弈为例,假定对手已经确定其

策略，通过观察对手在博弈过程中重复出现的表现，就可以了解对手在对策树上不同分支（选择）处的策略。利用这些信息，我们可以为对手的策略建立模型。由于存在着太多可能的策略，事实上无法通过“试错法”获得对其完全详尽的描述。所以建立的模型往往缺少许多细节。虽然如此，只要模型在某些方面正确，我们就能借助它进行更好的选择。

这些观察结果广泛应用于比棋类游戏更具普遍性的“博弈”中。假设在博弈中，对手之一是“大自然”，其实当人们执行一项计划（策略）以改进生态系统（大自然）时就是如此。即使大自然的运行确实是遵循一套固定的规则（规律），博弈的结果仍然是难以预测的。然而，经过长期的观察，我们就能够逐渐为生态系统及其针对人类活动所作出的反应建立模型。这正是许多科学研究中通常采取的方式。

（三）涌现理论的重要概念

在发展过程的每个阶段，都存在一些一般性的，但却起着关键作用的概念。①

1. 积木块

可以把积木块技术性地定义为发生器，但是它的全部含义远不止于此。积木块概括了从物理学的机制，到我们将周围环境分解为各种熟悉事物的方法的大量内容。积木块提供了一种方法，对具有涌现现象的系统中不断出现的新奇事物，运用这种方法能够抽取出基本的特征。

2. 模型

这是研究涌现现象最重要的概念。构造模型的关键步骤是选择显著的特征（等价类）和规律（发生器和转换函数），这些特征和规律支配着模型的行为。模型建立的步骤是在隐喻和“源一目标”

---

①约翰·H. 霍兰. 涌现——从混沌到有序[M]. 陈禹，译. 上海：上海科学技术出版社，2006：230-231.

模型的引导下逐步完成的。没有完全理解模型，是无法理解涌现和创新的。

3. 主体

大多数具有涌现现象的系统都可以根据主体间的相互作用来建模。从随机相互作用的桌球模型到能够自适应和自学习的有机体组织，都存在主体，它提供了对具有涌现现象的系统建模的最快方法。蚁群中的蚂蚁、神经网络中的神经元，或者物理学中的基本粒子——都可以由一些规则和规律来描述，这些规则和规律决定了这些主体在一个大环境中的行为。在每一种情况中，我们都能将这些主体的行为描述成处理的物质、能量或信息，它们可以产生某一行为，这一行为通常就是物质、能量、信息的传递。说得更通俗些，主体的功能就是处理输入并产生输出。利用状态的概念我们可以更深入一些：可以这样说，正在被处理的一个输入状态产生了一个输出状态。输入状态是由主体的当前实时环境所决定，而生成的输出状态则决定了主体将对当前实时环境造成的影响。当一只蚂蚁发现食物时（输入状态），开始在路途上留下返回蚁穴的气味（影响环境的输出状态）。对于一个给定主体的相互作用则可以这样来描述，即其他主体作为它的输入状态而带来的影响，这就像我们描述脉冲到达神经元表面时所带来的影响一样。

四、霍兰涌现理论的建构过程

霍兰认为，涌现的概念（即整体大于其各部分之和）简单得令人惊讶，然而它在科学、商业以及艺术等诸多领域中都具有极深的寓意。不过，它只是一种隐喻的描述，要完成科学语言的表达，就必须构造出各种科学的模型。

在《涌现》一书中，霍兰熟练地使用隐喻方法构建出他那著名的涌现理论。他在该书中首先从数字、游戏、地图、西洋跳棋、神经网络等隐喻性概念出发，建立起显示涌现现象的不同系统和模型，展现了它们之间共同的规则或规律，讲述了从蕴涵着规范、能够生成像巨大的红杉和普通的雏菊那样复杂而独特结构的微小种子，到能够通过自学在西洋跳棋游戏中让设计者一败涂地的计算机；

从能够修建桥梁、跨越深沟到驾驭树叶之舟在溪流上航行的蚁群，到诗人充满感情的创作等涌现现象的具体表现。他用具有隐喻性的简单术语——涌现，深入浅出地向我们生动地阐明：涌现的理论能够预言很多复杂的行为，同时也给予我们关于生命、智慧和组织的很多启示。

霍兰对涌现问题的探索是从数字和棋类游戏这两种发明开始的，两者在人类有文明记载之前就已经存在了。它们很容易描述，却并不简单。由它们简短而直接的定义所产生的现象，让我们一直仔细研究到现在，并且成效颇丰。它们很容易地阐释了涌现现象的基本特征：简单中孕育着复杂。与此同时我们也提出了一个问题：这样的发明是如何产生的呢？要理解涌现现象，就必须先理解创造这些发明的过程。所以，霍兰认为，西洋跳棋和神经网络是研究涌现的两个最合适的隐喻模型。霍兰的涌现理论花了大量的篇幅对这两个隐喻模型进行详细的分析，引进了大量的隐喻性概念和理论。例如，他对西洋跳棋进行了分析，“希望找到由简单规则控制的模型来解释复杂现象”，并认为，对于涌现现象而言，生长出来的复杂性是一个基本思想。如果我们要理解涌现现象，就需要进一步研究这种生长出来的复杂性。① 如何来分析这种生长出来的复杂性呢？他把它看作一棵能够生长的树：

我们经常看到树，但是我们看树的方式和看到的树从不相同。每次看到树时，不同的光线、不同的角度都会在视网膜上留下不同的影像。如果考虑细节因素的话，就会看到各种各样不同的树，然而我们很自然地把它们归为“树”。更神奇的是，我们可以很容易地把树进一步分解为“树根”“树干”“树枝”和“树叶”。这些积木块以不同的方式组合，从而使我们构建和认识不同种类的树。这有些像孩子们玩的积木，它们都能够以不同的方式组合。正如游戏一样，只有某些组合是合法的，除非我们想构建一棵根和叶倒置的“猴面包树”。有时，为了追求生动或者出乎意料的效果，我们会尝试“不合法”的布局，但那些都是例外，而不是规则。②

①约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹，译.上海：上海科技出版社，2001:85.
②约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹，译.上海：上海科技出版社，2001:80.

在一种隐喻的意义上，我们能够继续使用树的模型，这样就可以把对于树的理解转移到更广的领域中。在讨论对策树时，甚至借助根、叶的概念，以扩展我们的理解。①

通过西洋跳棋这个隐喻模型的详细分析，我们可以看出，霍兰把隐喻方法当作分析涌现的主要方法。他把隐喻方法应用到神经网络的分析中，继续印证其涌现假设。正是通过西洋跳棋和神经网络的隐喻分析，他提出了涌现的普适理论，认为涌现是"复杂的事物是从小而简单的事物中发展而来的"，②"涌现的本质就是由小生大，由简入繁"的受限生成过程。③

霍兰为什么要选择用隐喻方法来构建其涌现理论呢？涌现现象是自古以来就存在着的普遍现象。日常的一些活动，如耕种，就依赖着涌现的一些基本经验——比如，必须知道影响种子发芽的各种条件。同时，人们的创造性活动，从对企业和政府进行改革到创建新的科学理论，所有这一切也都涉及受控制的涌现现象。但是它又似乎很难纳入西方近现代科学的分析范式之中，因而变成了一种神秘的、似乎似是而非的现象。"这种现象往往带有暴发致富的味道。"④能够产生涌现现象的都是一些复杂适应系统——蚁群、神经网络系统、人体免疫系统、因特网和全球经济系统等。在这些系统中，构成系统的要素都是具有能动性的适应性主体（agent），"少数规则和规律就能产生令人惊讶的、错综复杂的系统"⑤，而且整体的行为要比其各个部分的行为复杂得多。面对如此复杂的现象，传统的机械还原的方法由于其一步一步近乎机械化的过程，忽略了想象力和创造力的重要性，因此难于揭示出涌现的奥秘。于是霍兰采用了隐喻方法，因为他认为，"隐喻、类比和模型，引导我们揭开世界上许多复杂的谜团"⑥，是一种能与诗歌相媲美的创造性思维方法。他相信，"丰富的隐喻和类比，是创造性科

---

①约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹，译.上海：上海科技出版社，2001：86.
②约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹，译.上海：上海科技出版社，2001：2.
③④约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹，译.上海：上海科技出版社，2001：3.
⑤约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹，译.上海：上海科技出版社，2001：5.
⑥约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹，译.上海：上海科技出版社，2001：236.

学和诗歌的核心”。[1] 特别是像涌现这样还披着神秘面纱的现象，要真正成为科学研究的对象，并揭示出其中的科学规律，就必须使用具有中国文化意蕴的隐喻方法。

霍兰从简单的棋类游戏、数字和积木模型开始，然后利用地图隐喻和对策论，建立起反映导致结构变化的不变性的规律的动态模型。在计算机的辅助下，通过西洋跳棋的隐喻类比，引入神经网络理论，建立起具有普适理论意义的基于主体的涌现模型。[2] 最后，通过受限生成过程分析和西洋跳棋程序的解剖，并嵌入遗传算法，霍兰建立了具有可变结构的受限生成过程模型。[3]

霍兰通过各种涌现模型向我们生动地展现了涌现的理论能够预言许多复杂的行为，同时也给予我们关于生命、智慧和组织的很多启示：

(1)每一个例子都是通过某种方式为真实的世界建立模型。甚至像国际象棋这样的游戏，事实上都是来源于早期战场上的真实场景，后来欧化以后，仍赋予棋子类似战场的角色：马代表骑士或武士，车代表城或堡垒，卒代表士兵，等等。

(2)每一个模型都包含着一定数量的相互作用着的棋子、粒子或部件。在如国际象棋和西洋跳棋这类棋类游戏中，我们面对的是具有一定名称的棋子。在神经网络中，我们考察的是有特定属性(神经网络的例子中提到的可变阈值、疲劳、赫布定律等——复杂的神经网络包含多种类型的神经元)的许多神经元。在物理学和化学模型中，基本组件是基本粒子和原子。模型的复杂性正是由这些组件之间的相互作用产生的。

(3)这些模型组件的配置会随着时间的变化而改变。通过仔细建模，这些组件下一步的配置都将完全由任意时刻前面一步的特定配置来决定。在棋类游戏中，我们只需要知道棋子的当前排列和符合规则的移动棋子的方式，就能决定下一步所采取的合理

---

①约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧，韩晖，译.上海：上海科技教育出版社，2000：中文版序.

②约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹，译.上海：上海科技出版社，2001：175.

③约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹，译.上海：上海科技出版社，2001：195.

走法。在神经网络模型中,每个神经元的激发状态(有无脉冲),以及它的阈值、疲劳程度、突触权重共同决定了下一步将要发生什么。在经典的物理学和化学中,我们需要知道的只是涉及粒子的位置和能量。也就是说,整个模型的状态是由元素的配置决定的,未来的可能性仅仅依赖于当前的状态,而与如何达到这个状态无关。

(4)相互作用往往受到一个简明规则表(或方程)的约束。所有可能的状态(或配置)序列都是根据这些规则重新排列的结果。在棋类游戏中,整个游戏是由一些规则定义的。在塞缪尔的跳棋程序中,运用基于游戏规则的一个展望树,一系列补充规则(计算机子程序)决定了特征权重的变化。在神经网络中,我们也有一些规则,和一系列补充规则一起,来决定当激发任一给定的神经元时,突触权重是如何变化的。在西洋跳棋和神经网络中,霍兰借用了对策论中的一个词——“策略”,来描述这些补充的规则。他还将其与另一个更技术化的概念——转换函数联系起来。

霍兰在研究复杂系统的涌现规律时,所使用的方法还有算法描述,不过霍兰把它称为“机制”。他用算法描述对产生涌现现象的元素、规则和相互作用进行了精确的描述,并把它称为受限生成过程。霍兰对涌现生成现象的机制描述从方法来说,其实就是一种典型的计算方法。他对涌现的初步研究为计算方法在复杂性研究中的应用提供了一个成功的案例。具体说来,对受限生成过程可以通过下面的四个步骤完成其机制的描述。①

(1)将规则的概念转换成机制的概念(如西洋跳棋中“跳”的规则或赫布定律)。正如规则之于游戏、规律之于物质系统一样,机制将被用来定义系统中的元素。简单地说,机制根据行为(或信息)作出反应,对输入进行处理并产生最终的输出行为(或信息)。在一般用法中,“机制”这个词会有多种含义。但是,霍兰用定义和符号来对这个词加以限定,以使它有一个统一明确的意思。

(2)用定义把多种机制连接起来形成网络,就是所说的受限生

①约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹,译.上海:上海科技出版社,2001:139-140.

成过程。很多模型都涉及不止一种机制(如物理学中不同的基本粒子),为了运用这种方法进行说明,必须明确机制的行为是如何影响其他机制的。在这个框架中,正是机制间的相互作用产生了复杂的有组织的行为。首先,霍兰将讨论具有各种约束条件的受限生成过程,这些约束条件是从棋类游戏的固定布局或者物理系统中的几何图形得到的启示。其次,他将着眼于一种概括性描述,以便明确为什么受限生成过程中的相互联系能够在一定条件下生成或被取消,从而改变已有的几何图形。

(3)这些机制(一旦连接起来,就会遇到类似于对策树的情况)是由一些带约束条件的相互作用着的机制产生的所有可能性的集合。状态树是模仿行为可能过程的一种便利方法,如游戏策略和动力学。为了实现这个目的,霍兰定义了总的受限生成过程的状态,这个状态将由组成这个受限生成过程的状态决定。霍兰把对西洋跳棋程序和神经网络进行过的研究工作,即将所有涉及将来可能性的与受限生成过程有关的一切事物,提炼成被称为全局状态的一个单一实体。然后,他继续描述从一种状态转换到另一种状态的合法方式。这样,霍兰用转换函数来精确描述了状态变化的可能性。

(4)霍兰还想提供受限生成过程中一个特别的过程,来定义子集合中的层次,这就是使用基本机制建立起更复杂的机制的过程。这将更便于对系统加以解释,并且使由此形成的结构与大多数表现出涌现现象的系统固有的层次性相一致。

五、涌现理论的基本要点

霍兰在《涌现》一书的最后章节中,对自己提出的涌现理论进行了全面的总结,把他的涌现理论概括为八个要点。①

(1)涌现现象出现在生成系统之中。这些系统是由那些种类相对较少并遵循着简单规律的一些基本元素组成的。一般来说,这些元素互相连接起来形成一种排列(西洋跳棋、网络、物质空间

①约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹,译.上海:上海科技出版社,2001:231-236.

中的点，等），这个排列在转换函数的作用下可以随时间变化。

（2）在这样的生成系统中，整体大于各部分之和。系统各部分间的相互作用是非线性的，所以系统的整体行为无法通过相对独立的各组成部分行为的简单叠加得到。换句话说，在系统行为中存在一些规则，这些规则是无法通过直接考察各组成部分所满足的规律来得到的。这些整体行为规则不但可以解释（或部分地解释）系统的行为，而且能够用以说明特定的行为控制方式（例如，在国际象棋中依靠棋子特定的组合，一个策略就能够使棋手持续取胜）。

生成系统的定义尽管决定了其他方面，但也只是简单描述的起点而已，以后的活动则要通过进一步的考察和试验决定。从这种意义上讲，输出大于输入。

（3）生成系统中一种典型的涌现现象是，组成部分不断改变的稳定模式。涌现现象使我们回忆起湍急的小溪中不断冲击石块的水流形成的驻波，其中的水分子不停地变化，而驻波的形状基本不变；在这一点上，它们同那些由固定成分组成的固态物质，如岩石和建筑物不同。典型的例子是运动并变化的棋子形成的棋局，或者一系列神经元的反射。有机体中也存在一些稳定的模式；在不到两年的时间跨度里，所有组成成分的原子都会更新，而且大部分成分大约一周就会更新一次，而器官整体从外形到功能一般不会有大变化。

只有这样的稳定模式才会对生成系统将来的结构产生直接的可追踪的影响。当然，系统的规则在一定程度上反映了系统结构和变化中所需遵循的联系，只有这样的稳定模式才是可跟踪的个体。

（4）涌现出来的稳定模式的功能是由其所处的环境决定的。由于非线性的相互作用，一些意义或功能是通过语境体现的。在康韦自动机中，具有不同作用的滑翔机同其他不同模式相互作用时，所表现出的功能也不同。这个例子很简单，定义也很完整。生物系统的多样性提供了一些更复杂的例子。例如，鱼鳃中作为活动连接装置的三块骨头演化到后来，就变成了使爬行类动物能把嘴张得很大的颚，再后来又演化为哺乳类动物内耳中的连接装置。

这三块骨头虽然随着时间的流逝保存下来，但它们所处的地方不同，功能也不同。正是这种变化的关联特点，使得涌现现象很难按一般的先验的方式加以定义和研究。

(5)随着稳定模式的增加，模式间相互作用带来的约束和检验使得系统的功能也在增强。举一个简单的例子，我们可以想一想借助DNA代码来加速修正复制过程中局部错误的方式。作为更复杂的例子，在蚁群和神经网络中，随个体数量的增长，系统也显示出这种涌现能力。

非线性相互作用以及由其他模式决定的环境(有时只是给定模式的副本)作用，都增强了这种能力。特别是随着相互作用者的数量增长，可能的相互作用的数量以及可能的引起反应的复杂程度也非常迅速地增长(按阶乘级数增长)。

(6)稳定模式通常满足宏观规律。当宏观规律可以用公式清楚地表达时，对整体模式行为的表述就不必再借助那些决定组成个体行为的微观规律(发生器和约束)。相对于组成个体行为的细节，宏观规律通常是较为简单的。描述康韦模型系统中滑翔机行为的规律就是一个很清楚的例子。

(7)存在差别的稳定性是那些产生了涌现现象的规律的典型结果。例如，在塞缪尔的西洋跳棋程序中，新的策略(新的权重)是通过修正那些稳定战胜对手的策略的权重得到的。在神经网络中，稳定的反射模式能够转变成具有更复杂行为的组成元素——赫布的细胞组合。另外，在达尔文的生物进化论中，能够产生新变异的，也正是那些持续时间长到足以积累足够的资源来复制自己的模式。

存在差别的稳定性具有不同的表现形式。有些模式只在没有遇到其他模式时存在；另一些模式则存在于相互作用中，并逐渐分解或者转化为其他模式；还有一些稳定模式只同极少的其他模式发生相互作用，并在所有其他环境中仅仅保持它们的形式不变。

存在差别的稳定性对生成过程可以有很强烈的影响。那些在多种相互作用中都存在的稳定模式很可能在生成过程的早期起着关键性的作用。这样，许多可能的组合都可以尝试，这就会提高发现更复杂的稳定模式的可能性。这些普通模式也为那些相互作用

范围有限的特殊模式提供了发挥作用的空间。某些情况下,特殊模式可以通过某种共生的方式同普通模式结合在一起,从而使普通模式在相互作用中不会解体。一个默认层次形成过程的图例说明了这样的相互作用(图2.6)。①

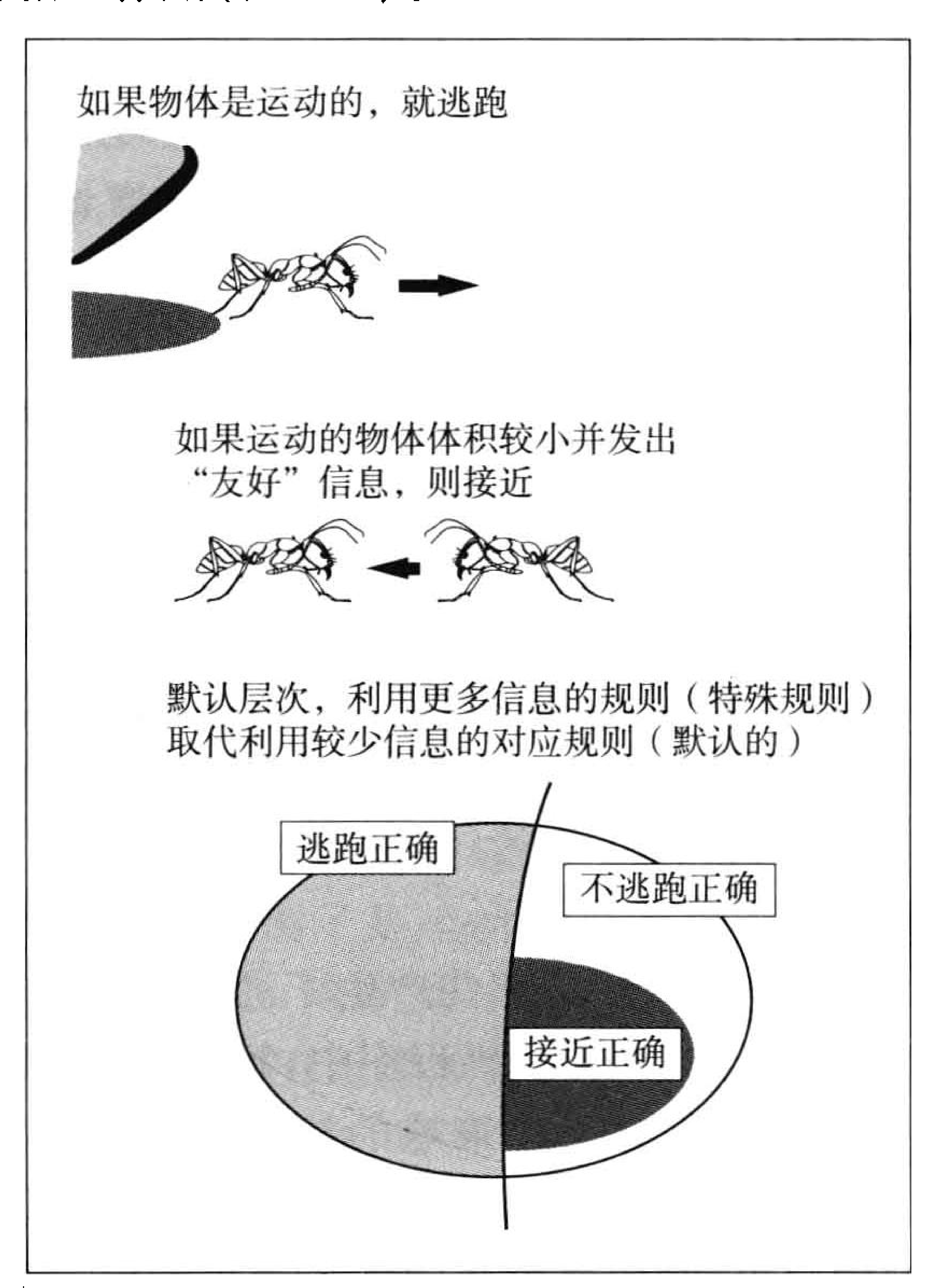


图2.6 一个默认的层次

考虑像蚂蚁这样简单的有机体,我们假定一条普遍的规则:无论何时,蚂蚁察觉到任何移动的物体都会逃走。绝大多数情况下,蚂蚁都严格遵循这样的规则,因为周围环境中多数运动着的较大的物体都可能使它"解体",这样的物体对它而言都是危险的。这条规则经常被验证,常常使蚂蚁能够避免受伤害并且从不遭受到直接的损失。即使不应该避开时,它也会这样做。另一方面,这个规则也排除了蚂蚁同其他运动中的蚂蚁直接接触的机会,就长期

①约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹,译.上海:上海科技出版社,2001:234.

而言,这是有害的。肯定有另外更特殊的规则存在,它能够对第一条规则进行修正:如果运动的物体很小并发出了"友善的"信号,那么就接近它。无论何时,当产生更为特殊的条件时,总是这个特殊的模式起作用,那么一种共生的关系就出现了。特殊模式能够防止普通模式出现错误而对整体造成长期的损害,同时,普通模式则在那些不会引起特殊模式作出反应的情况下防止蚂蚁个体的"解体"。

对于稳定性,普通模式比特殊模式更容易得到验证,因为多数情况下,都会发现普通模式的痕迹,而在同样的时间内,只能发现少量特殊模式的痕迹。结果是,普通模式为特殊模式提供了一个相对稳定的小空间,这使得它们之间可以相互作用。那些较难被验证的特殊模式在"开放"的环境中更容易解体。此外,如何选取观察系统的时空尺度,往往也决定了涌现的宏观规律和分层生成过程。

(8)更高层的生成过程可以由稳定性的强化而产生。相互支持作用,例如,共生现象与艾根(Manfred Eigen)和温克勒(Ruthild Winkler)1981 年提出的生命周期延长问题,常常会给组成部分的模式带来稳定性的强化。当这些具有强化稳定性的模式满足宏观规律时,新的生成过程就会取代原来的生成过程。

这样的生成过程仍然遵循潜在的生成过程的规律,但它所产生的模式绝对不可能通过对原来生成器的先期考察得到。更高层次的生成过程被强化的稳定性极度放大,最终完全"代替"了基础的生成过程。

达尔文关于哺乳动物眼睛的起源问题的论述,就是一个引起高层次生成过程的好例子。这样的生成过程使那些以前对基本元素的观察而言不可能存在的模式成为可能。在达尔文之前,人们认为像眼球这样精致的器官只能是上帝创造的结果——它的组成部分不可能偶然组合到一起,成为这样精巧的东西。事实上,眼睛同许多生物器官一样,如果仅仅认为它是从所有由原子组成的大量物质中随机挑选出来的,那么它确实不会像现在这个样子。

达尔文宏观上的论述现在已得到关于眼睛的分子生物学深层次的证实,而这些事实在达尔文写生物进化论的时代还是不可知

的。现在我们知道，光能改变了某些结构相对简单的生物分子键，并产生一系列可能的连锁反应。例如，它能够激活神经元。光敏化合物、类透镜、晶状体、神经元等，作为更高层生成过程的积木块(生成器)，最终形成了眼睛。达尔文关于眼睛形成过程的论断，根据受限生成过程之间的迭代关系是很容易得到验证的。就基于原子间的相互作用形成分子的生成过程而言，这些确实是不可能的事情——一旦考虑到一个更高层生成过程的形成时，涌现现象几乎是必然会出现的。

眼睛的生成过程在进化中至少发生过两次，一次是哺乳类动物，一次是头足类动物。在这两种情况中，利用的积木块(化合物、细胞形态等)并不同，但最终形成的复杂结构——眼睛，却由相同的构件组成(透镜、调焦系统、视网膜)。在某些方面，头足类动物(像鱿鱼和章鱼)的眼睛甚至比哺乳类动物的设计得还要好。显然，当我们考虑到积木块时，眼睛的形成就不再是不可能的了。这种将极不可能转化为可能实现，是具有涌现现象系统的重要特征。当系统可以运行无限长的时间时，在生成过程中即使是很少出现的最简单的稳定模式最终也会发生，而且一旦发生就肯定会持续下去，并同其他模式(其他的复制或变异)相结合，从而出现更大、具有更强稳定性和能力的模式。一旦发现最初的积木块能够产生自繁衍，组织的组合数量就会急剧增加。有些人会认为进化过程所需要的很多结构不可能出现，即使出现，它的过程也是“极缓慢的”，持有这种观点的人忽略了进化加速。如果考虑到一系列分层的生成过程，不可能的也将成为可能的。

第三节　复杂系统的涌现生成方法

霍兰的涌现理论在复杂性理论群中主要就是解决复杂组织的生成条件问题，他希望通过其建构的涌现理论，揭示出万事万物涌现生成的奥秘，特别是产生涌现现象所需要的基本条件。从霍兰的涌现理论中可以看出，霍兰论述的组织涌现生成条件主要包括生成主体、非线性相互作用、自组织、受限生成、环境策略等五个方

面。这五个条件虽然还不是充分必要条件,但具备这些条件,系统就可能产生涌现现象。

一、生成主体:涌现生成的组成要素

宇宙万物从何而来?构成论认为,宇宙既定既成,本来如此。但生成论认为,宇宙并非本来如此,而是有生成演化的过程。现代科学认为,宇宙中的万事万物都有涌现生成的过程。但无论是科学还是哲学,事物究竟是怎样涌现的,目前都还是一个难题。马克思主义哲学把该问题作为哲学的基本问题,并根据不同的回答来划分出唯物论和唯心论。从哲学层面来说,主要有两种涌现生成观,即有生于无和有生于有。①

我国古代哲学家老子在两千多年前就提出了"有生于无"以及"道生一,一生二,二生三,三生万物"这些著名的观点。有生于无主要是从终极的层面来说的,从宇宙的发生学来探讨终极来源问题。从终极发生的角度来看,宇宙应该是从无到有生成而来。现代宇宙学认为,宇宙有一个基本的起点,它在大爆炸之前宇宙并不存在。

"有生于有"更多的是关心在宇宙生成以后,分化出宇宙间的万事万物,形成多样性的大千世界。虽然在 A 生成之前的世界还没有 A,但有了种种非 A 的存在,为 A 的涌现生成提供了种子和资源、环境等条件,有了这些涌现生成的条件,根据某种生成规则或机制,形成千差万别的多样性的世界。

"有生于无"的涌现生成观更有哲学思辨性,但在科学上则基本上还属于猜想或假设阶段,科学依据不多,缺乏可操作性。"有生于有"的生成观,其哲学思辨性不强,但具有更多科学成果的支持,具有比较可靠的科学基础,因此更具有可操作性,并能够解释组织涌现生成的具体条件。复杂性科学所关心的涌现生成主要是一种"有生于有"的生成观,是对科学层面涌现生成理论的一般概括和抽象,具有一般科学方法论的意蕴。

---

①苗东升.系统科学精要[M].2版.北京:中国人民大学出版社,2006:37.

根据“有生于有”的涌现生成观的哲学假设，生成一个组织的涌现生成首先要有种子的存在，金吾伦称之为“生子”，苗东升则称之为“微子”，而霍兰把它称之为“主体（agent）”，更多的时候他称之为积木（building block）。

金吾伦认为，生成是宇宙本身的内在特性。“创生性是宇宙中诸共相的共相，是宇宙最本质的特性。有了生成的能力，新事物才能不断产生，才有时间和空间，也才有世间万事万物。”[①]他把宇宙的这种内在特性和能力，称为“生子”。他认为，生子是生成的因子，具有自主性、自组织性和有机性，是“其小无内”，具有无限可分性。生子中不包含万物尔后生长中所具备的一切基因，而是在生长中实现和生成的，因此具有“无中生有”的性质。

苗东升从唯物辩证法出发，认为现实世界的一切事物都不是给定的，而是生成的。他从中国哲学的有无之辨中得到启发，提出“有生于微”的观点。[②] 他提出，在有和无之间引入一个新范畴：“微”，让它成为沟通有和无之间的中介。什么是“微”呢？苗东升说：“从哲学上看，如果把有和无看作两种相反的状态，则微是介于有和无之间的另一种存在状态，一种亦有亦无、非有非无的存在状态。借用数学语言讲，把有表示为 1，把无表示为 0，则微是介于 1 和 0 之间的非零正无穷小 ε。就量而言，微 ε 极为接近 0 而远小于 1，微乎其微，微不足道；就质而言，微 ε 非同小可，因为它本质上不同于无而接近于有，只要有了这个看似微不足道的 ε，事物的生成过程就启动了；只要具备必要的条件，经历一个有限过程后，该事物即可取得‘有’这种存在状态。”[③]

霍兰在论述复杂适应系统时正式提出了“主体”这个词[④]。主体（agent）的全称是适应性主体（adaptive agent），它本来是经济学中的用语，表示代理人或代理商的意思。霍兰把它借用过来表示具有适应能力的个体，以强调它的主动性，强调它具有自己的目标、内部结构和生存能力。例如，蚁群中的蚂蚁、神经网络的神经

---

①金吾伦. 生成哲学[M]. 保定：河北大学出版社，2000：188.

②③苗东升. 系统科学精要[M]. 北京：中国人民大学出版社，2006：39.

④约翰·H. 霍兰. 隐秩序[M]. 周晓牧，韩晖，译. 上海：上海科技教育出版社，2000：6-7.

元等。任何事物的涌现生成，都需要具有涌现生成能力的生成主体，需要最基本的积木块，就像建筑学家要建造一个建筑，不管要建设成什么造型设计，但首先要有基本的建筑材料，如砖块、钢筋、水泥、沙石等。所以霍兰认为，任何一个涌现模型都应该包含着一定数量的相互作用的组成部件，即主体。例如在国际象棋和西洋跳棋这类棋类游戏中，我们面对的是具有一定名称的棋子。在神经网络中，我们考察的是有特定属性的许多神经元。在物理学和化学模型中，基本组件是基本粒子和原子。可以说，生成主体是一切涌现生成现象发生的始基或种子，是涌现生成的首要条件。

二、相互作用：生成主体的耦合方式

涌现是指系统由于内部组分的微观相互作用而出现新的宏观功能和结构。正是因为涌现具备“无中生有”的性质，能使系统增加新的东西，复杂系统的整体才能够出现大于各部分相加之和的现象。系统整体涌现性的来源，归根到底在于系统组分（要素和子系统）之间、层次之间、系统与环境之间的相互作用，涌现性是组分之间、层次之间、系统和环境之间互动互应所激发出来的系统整体效应。把整体分为部分，意味着组分之间、层次之间的联系被切断，相互作用不存在，激发效应便无从谈起；组分之间没有互动互应的整体不成其为系统，整体与环境的相互作用也无从谈起。正因为如此，系统一旦被分解为组分，整体涌现性便不复存在。相反，如果按照一定结构模式把组分整合在一起，把系统和它的环境结合在一起，所有组分之间、层次之间、系统和环境之间处于真实的相互联系、相互作用之中，必然在系统整体层次上涌现出特定的激发效应出来。[①] 所以相互作用是产生涌现的必要条件之一。

西方学者保罗·西利亚斯（Paul Cilliers）认为，要构成一个复杂系统，要素之间必须有相互作用。系统中的任何要素都在影响若干其他要素，并受到其他要素的影响。[②] 相互作用自身具有若干

①苗东升. 系统科学精要[M]. 北京：中国人民大学出版社，2006：58.

②保罗·西利亚斯. 复杂性与后现代主义[M]. 曾国屏，译. 上海：上海科技教育出版社，2006：5.

重要的特征，具有丰富多样的相互作用形式。首先，相互作用是非线性的，只有非线性才能产生小原因可能导致大结果，线性相互作用只能产生加和效应，不能产生放大效应。其次，相互作用常常是作用于某个相对小的短程范围，即主要是从直接相邻接受信息。最后，相互作用是通过反馈回路来实现的。任何活动的效应都可以反馈到其自身，有时是直接的，有时要经过一些中间过程，但反馈的形式只有两种：一是正反馈，它可以相互激发，作用加强；另一种是负反馈，它可以相互抑制，作用减弱。

各个组成部分如果没有相互作用，仅仅是一盘散沙，不成其为系统，更不可能产生涌现行为。涌现行为是一种整体行为，而整体行为是组分之间因相互作用而产生的。金观涛在建构系统哲学时正是把相互作用当做系统整体行为的基石，他把相互作用称为功能耦合。① 一切整体涌现性都是组成整体的各部分组分间相互作用、相互制约的结果，是组分相互作用造成的结构效应、组织效应和功能效应。

相互作用有两种类型：线性和非线性。其实任何相互作用从本质上来说都是非线性的，只是强弱程度不同罢了。但是因为非线性问题目前还没有比较好的处理办法，于是一般都将非线性问题线性化，或者忽略弱的非线性。线性相互作用产生的整体效应是加和式的整体效应，其相互作用所产生的是简单的、微弱的涌现性，而且这种涌现性是在人们的预测范围之内，因此不作为涌现理论的研究范畴。非线性相互作用产生的涌现现象不能被简单预测和把握；只有非线性相互作用才能产生非加和效应，才能够产生复杂的强涌现行为。因此，“涌现现象、涌现性本质上是非线性的，它们都来源于非线性”。②

在计算机出现之前，我们研究带有大量主体的模型时，遇到非线性相互问题时有两种处理办法，一是线性化，即把非线性问题进行线性化处理；二是平均化，即假设主体个体都表现出一种典型的，或者说是“平均的”行为——而整个模型的行为可以看作是这

---

①金观涛. 整体的哲学[M]. 成都：四川人民出版社，1987:50-51.

②李士勇. 非线性科学与复杂性科学[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2006:152.

些平均行为的总和。对这些总的行为进行的分析经常能够提供关于多主体系统的有用信息。物理学中的统计力学方法和研究生态系统相互作用的矩阵方法的运用,都提供了令人信服的例子。但是这些平均行为有它的局限性。蚁群的行为并不是一群蚂蚁行为的简单总和。蚂蚁之间耦合的相互作用提供的这种群体内的凝聚现象,远远超出了简单总和所能够预测的。

霍兰认为,涌现首先是一种具有耦合性的前后关联的相互作用。在技术上,这些相互作用以及这个作用产生的系统都是非线性的。整个系统的行为不能通过对系统的各个组成部分进行简单的求和得到。我们不可能在棋类游戏中通过汇编棋子各步走法的统计值来真正了解棋手的策略,也不可能通过蚂蚁的平均活动了解整个蚁群的行为。在这些情况下,整体确实大于局部之和。但是,如果我们考虑非线性的相互作用,就可以将整个系统的行为简化为其组成部分合乎规定的行为。① 产生涌现的生成主体只有通过具有放大效应的非线性机制才能把生成主体的信息放大,种子才能发芽生长。大多数产生涌现现象的系统都可以借助主体间的相互作用来模拟,因此非线性相互作用是涌现产生的一个基本条件。

三、自组织:涌现生成的动力机制

在涌现生成的系统中,具有大量的构成要素,即生成主体,是通过什么样的组织机制结合在一起,并形成非线性相互作用的?从组织方式或动力来说,无非有两种,一种是来自系统的外部,一种来自系统的内部,前者被称为“被组织”,后者被称为“自组织”。所谓自组织系统即指:“无需外界特定指令而能自行组织、自行创生、自行演化,能够自主地从无序走向有序,形成有结构的系统。”② 所谓被组织系统即是指这样的系统:“它不能自行组织、自行创生、自行演化,不能够自主地从无序走向有序,而只能依靠外界的特定

①约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹,译.上海:上海科技出版社,2001:133-134.
②吴彤.自组织方法论研究[M].北京:清华大学出版社,2001:3.

指令来推动组织和向有序的演化,从而被动地从无序走向有序。”①

组织的涌现生成中,人工组织即人工系统一般都是通过人工这个外在的组织力量,根据设计者的目的而进行组织和设计,朝着设计者的目标而发展,然而人工组织起来的被组织系统,基本上没有自我演化和不断进化的能力。自然界中的涌现生成系统,基本上都属于自组织系统,其组织的动力来自系统的内部,来自生成主体之间的相互作用。霍兰认为涌现生成系统组成机制间的相互作用不受某个中央力量的控制,而且随着机制之间相互作用的增强,灵活性不断提高,涌现现象出现的可能性也不断增大。②

在涌现生成的过程中,生成主体在没有外部设计者的干预或不存在某种中央化形式的内部控制的情形下,内部结构自身能够发生进化。如果系统的能力满足一些约束条件,则能够通过自组织过程而涌现出分布形式的内部结构。这个过程中,结构既不是对系统外部因素的被动反应,也不是主动地按照预先编程的内部因素的结果,而是在环境、系统的目前状态和系统的历史状态之间的复杂相互作用的结果。

保罗·西利亚斯对复杂系统的自组织进行了比较全面的探讨,认为自组织是复杂系统的一种能力,它使得系统可以自发地、适应性地发展或改变其内部结构,以更好地应付或处理它们的环境。他从八个方面对自组织进行了论述③:

(1)系统的结构不是先验设计的结果,也不是直接由外部条件所决定的,它是系统与其环境之间相互作用的结果。

(2)系统的内部结构可以动态地适应环境的变化,即便这些变化没有规律。

(3)自组织不只是如同反馈或可以线性描述的调整的结果。它包括了较高级的秩序、非线性的过程,不可能以一组线性微分方程来进行建模。

---

①吴彤.自组织方法论研究[M].北京:清华大学出版社,2001:3.

②约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹,译.上海:上海科技出版社,2001:8.

③保罗·西利亚斯.复杂性与后现代主义[M].曾国屏,译.上海:上海科技教育出版社,2006:125.

（4）自组织是系统作为一个整体的（或充分大量子系统的）涌现性质。系统的个体组分仅仅依靠局域信息和一般原理而运行。宏观行为从微观的相互作用中涌现出来，微观相互作用本身只有非常微弱的信息量（仅仅是痕迹）。将分析限制在微观水平上，有可能按照一些简单转化来解释每一要素的行为。从宏观进行观察，简单的、局域的相互作用可以导致复杂行为。

（5）自组织系统的复杂性能够增长。由于它们必须从经验中“学习”，它们必须“记忆”先前遭遇过的情形并将之与新的情形进行比较。如果更多“先前的信息”可以被存贮，系统将能够进行更好的比较。这种复杂性的增长，意味着熵的局域倒转，这对于能量或信息在系统流通是必要的。

（6）没有某种形式的记忆就不可能有自组织。没有记忆，系统就仅仅作为镜子对环境进行映射。因此，一个自组织系统总是具有历史的。这种历时性因素在对于系统的任何描述中都是不能忽视的，因为系统先前的状况会对现在的行为产生至关重要的影响。另一方面，没有某种选择性遗忘，记忆也是不可能的。仅仅是堆积信息而没有某种形式的整合，会使它没有意义。只有系统能够记忆和遗忘，自组织才是可能的。

（7）自组织过程不是被特定目标所指引或决定，因此对自组织系统的功能进行讨论往往是困难的。只要我们引入了功能的概念，我们就有了拟人性或是为系统的结构引入了某种外部理由的风险，而这些正是我们力图避免的。但当一个系统在更大系统的语境中被描述时，对于系统功能的讨论只有在那种语境中才是可能的。自组织的过程不可能是由实施某种功能的企图而推动的，更确切地说它是某种进化过程的结果。系统如果不能够适应更复杂的环境，便不可能生存。

（8）对自组织系统以粗糙的还原主义加以描述是不可能的。因为微观单元不“知道”大规模的效应，同时这些效应是以集体的方式展示出来，不包括任何除了这些微观单元之外的东西，因此对系统的种种“层次”不可能独立地加以描述，各层次原则上是相互交织的。

简而言之，复杂系统中的自组织过程以如下的方式运行。从

外部世界来的信息簇流入到系统中。这种信息将影响系统中的某些组分的相互作用——它将改变网络中的权重值。按照赫布规则,如果一定的簇是规则地呈现的,系统将获得一组稳定的、"表征"着那簇(即在特定群簇每次呈现时导致特定的活动模式)的权重。如果两个簇是规则地共同出现的,系统将自动地建立两者之间的某种联系。例如,如果一定的事态规则地引起对于系统的损害,系统便将联系那种有损害的条件,而不必预先知道那种条件是有害的。随着系统遇上环境中的不同条件,它在由系统可利用的记忆所决定的约束下,产生出新的结构以"表征"这些条件。

相互作用构成功能耦合系统,形成输入—输出相互耦合的复杂网络结构。在线性系统中,上级下级、低级高级,层次清楚、主次分明、等级森严;在复杂系统中,主体之间是平等的、平行的,分不清系统中各组分哪个是主要的,哪个是次要的。正如在一个发育的胚胎中,没有哪个细胞是主要的,也没有哪个细胞是次要的。①

一群大雁在天空中飞过时,会排成一字或人字形。通常人们会认为,飞在最前头的大雁一定是这群大雁的头领,雁群跟随头雁,飞成这种能最大限度地减少空气阻力的阵形。其实,当雁群刚起飞时,是没有阵形的。大雁们只是在飞的过程中逐渐感觉到怎样飞最省力,并本能地据此调整自己的方向和位置。最后,它们飞成的阵形,从人的视野来看,不管是"一"还是"人"字,一定有一只大雁在最前面,后面跟着雁群的其他成员。人只是将大雁比拟为自身,或是将自身比拟为大雁,附会出"大雁高飞头雁领"的意义罢了。事实上,如果没有观察到大雁们按程序在雁群中选举出头领,或者通过决斗,由裁判宣布某只大雁胜出,那就只能认为头雁是自发产生的,是涌现出来的。②

通过自组织,系统的涌现由局部成分间的非线性相互作用而产生,而系统又能通过反馈作用或者增加新限制条件来影响组分间相互作用关系的进一步发展。系统的涌现不是通过自上而下的预定目标,而是由于组分之间相互作用而产生的自下而上的集体

---

①②关筱霞.扔出小鸟——混沌边缘的经济学[M].重庆:重庆出版社,2005:75.

效应所不可避免的客观结果。"涌现和自组织是一对双胞胎，所不同的是，涌现强调的是系统自发形成新的宏观结构，而自组织强调的却是系统在形成新的宏观结构过程中组分之间的相互作用。"①

四、受限生成：涌现生成的内在逻辑

涌现生成是自组织的行为，是自下而上的整合过程。在生成主体的涌现生成过程中，生成主体的相互作用其实就是系统组分之间通过各种排列组合（即算法），形成功能耦合系统的过程。自下而上的事物由于具有数量巨大的排列组合方式，比自上而下的事物还原过程更复杂，因而更有生命力。例如，中国象棋的棋路虽然千变万化，但从还原的角度来看，无非就是红黑双方各自拥有的16颗棋子，一个9×10的方格棋盘以及几条简单的规则。这些看起来都特别简单，小学生都能够完全认识和掌握。但是，就是这么几个简单的东西，经过双方棋手的博弈，棋局却变幻莫测。假设只有10种可能移动方式的棋类游戏，经过10次移动，就有10^{10} = 10 000 000 000种不同方式。可见，从下到上的整合过程比起从上到下的还原过程更加丰富多彩，也更加难于预测。但是，生成主体之间并非可以随意、随机进行组合，而是也要受到一些规则的限制，所以霍兰把它称为"受限生成过程"。②

所谓受限生成过程就是生成主体根据某些规则的限制条件进行功能耦合，生成出新状态的一个状态的动态行为，也是系统涌现生成的具体发生、演变的状态遍历过程。用霍兰的话来说，"我们将遵循科学家常用的由直观逐步走向精确的研究方法，其结果将是一个我称之为受限生成过程的概念，它是一个范围很广的模型的精确描述。由于生成的模型是动态的，所以我称之为'过程'；支撑这个模型的机制'生成'了动态的行为；而事先规定好的机制间的相互作用'约束'或'限制'了这种可能性，就像游戏的规则约束了可能的棋局一样。""任何受限生成过程都能表现出涌现特性。"③

---

①李士勇．非线性科学与复杂性科学［M］．哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2006：153.

②约翰·H．霍兰．涌现——从混沌到有序［M］．陈禹，译．上海：上海科技出版社，2001：127-144.

③约翰·H．霍兰．涌现——从混沌到有序［M］．陈禹，译．上海：上海科技出版社，2001：128.

霍兰认为，对受限生成过程的理解可以通过四个步骤完成。①

（1）将规则的概念转换成机制的概念（如西洋跳棋中"跳"的规则或赫布定律）。正如规则之于游戏、规律之于物质系统一样，机制将被用来定义系统中的元素。简单地说，机制根据行为（或信息）作出反应，对输入进行处理并产生最终的输出行为（或信息）。更复杂的机制可能会有多个输入，并产生若干个不同的输出。

（2）用定义把多种机制连接起来形成网络，就是受限生成过程。正是机制间的相互作用产生了复杂的有组织的行为。

（3）将各种机制连接起来，形成类似于对策树的可能性空间——由一些带约束条件的相互作用着的机制产生的所有可能性的集合。

（4）利用嵌套方法，将基本机制作为高层机制的构件，形成不同层次的机制。这就是使用基本机制建立起更复杂的机制的过程。这将更便于对系统加以解释，并且使由此形成的结构与大多数表现出涌现现象的系统固有的层次性相一致。把一个总的受限生成过程作为一个机制，用来建立更为复杂的受限生成过程。通过这种方式对受限生成过程加以定义，我们就抓住了展现涌现现象的系统的层次性，而这种层次性恰恰是这类系统的主要特性。

这里要注意要把受限生成过程分成三个关键词来进行理解。

（1）所谓受限就是产生涌现的生成主体要受到一些规律、规则的约束或限制，这也就是说，生成主体之间的相互作用并不是像一盘散沙，可以随意堆砌，或者随意排列和组合，而是要受到规律、规则的限制。例如中国象棋，双方的 16 颗棋子在棋盘上有一定的摆放规则，移动棋子也有一定的约束，比如马走日，象飞田，等等，每个棋子在移动中都要受到一定的约束和限制，并不是完全随意地移动。如果可以随意排列、组合，其状态空间当然是最大，但这样不一定能产生涌现行为，例如砖块、水泥、沙子、钢筋等建筑材料，如果简单地组合在一起，虽然可以随意堆放，但很难堆出高楼大厦。如果按照建筑师的设计进行组合，就产生了各种各样的精美建筑。建筑师的设计无非就是对这些建筑材料进行各种约束或限

①约翰·H. 霍兰. 涌现——从混沌到有序[M]. 陈禹，译. 上海：上海科技出版社，2001：128-131.

制,也就是说这些建筑材料的组合是受限的。生成主体在规律、规则的约束之下,其组合的状态空间将大大减小。我们一旦掌握了这些规则或规律,将更容易预测生成主体相互作用后所产生的涌现行为。我们探索涌现的规律其实可以转而探索这些作为约束条件的规律或规则。在自然科学中,这些约束一般都可以表达为函数或者方程式。"转换函数及其包含的规则,将可能状态、可能空间约束成为一条现实世界的轨线。"①霍兰说:"对涌现的研究是与这样一种能力密切联系的,即用比较少的一系列规则,去确定较大的复杂领域的能力。"②除了游戏和神经网络外,霍兰还经常提到欧几里得公理、牛顿定律和麦克斯韦方程这些也是由简单规则控制的模型。这些模型尽管定义很简单,但是即使经过几百上千年的研究,它们仍然足够复杂到能使我们对其产生很多新的理解。

(2)所谓生成就是生成主体在规律、规则的约束之下,根据生成规则进行各种可能的生成演化活动。整个复杂系统及其涌现生成过程的关键就是由少数几条简单的规则支配的主体构件(即生成主体)在其大量的相互作用和反复迭代中产生出巨大的复杂性和涌现性、不可预测的新颖性和不可还原的整体性的过程。③

(3)所谓过程就是强调涌现生成是一个需要时间展现的动态行为,也就是说生成主体的涌现生成行为并不是一步到位的事情,而是随着事物的发展而逐渐地展开。例如,中国象棋的两个棋手,要经过数十步的双方博弈、对弈,才能出现最终的输赢棋局,人们喜欢看双方对弈的过程,正因为对弈过程才是最精彩的,输赢结果只有一个,但其对弈过程千变万化。

霍兰指出,弄清楚系统的演化规律以及它们之间的相互关系,将有助于我们理解复杂系统的涌现现象。从各种涌现案例的分析中发现,虽然组成系统的元素及其属性往往极其简单,但经过非线性相互作用以及学习、适应、自组织等,它们将产生十分复杂、令人难于预测的复杂涌现行为。因此,由少数规则和规律可以产生令

①颜泽贤.系统科学导论[M].北京:人民出版社,2006:400.
②约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹,译.上海:上海科技出版社,2001:126.
③颜泽贤.系统科学导论[M].北京:人民出版社,2006:399.

人惊讶的、错综复杂的关系，并以不断变化的形式产生新的涌现现象。从受限生成过程来看，霍兰发现涌现生成过程的几个特点①：

（1）简单得近乎荒谬的规则（转换函数）能够生成固有的涌现现象；

（2）涌现现象是以相互作用为中心的，它比单个行为的简单累加要复杂得多；

（3）稳定的涌现现象可以作为更复杂涌现现象的组成部分。

在复杂性的研究中，几乎没有任何能够隐藏的东西，也不存在所谓神秘的不可解释的行为，涌现生成看似神秘，其实也是可以得到科学解释的现象。

五、学习适应：涌现生成的环境策略

热力学定律早已证明，在一个封闭的系统里，系统因为不能从外界得到需要的物质、信息和能量，必然会走向均衡、无序和死亡。涌现是一个从无到有、从无序到有序的过程，“涌现的本质就是由小生大，由简入繁”②，例如小小的种子能成长为各式各样复杂的生物体，为数不多的一组游戏规则能衍生出极其复杂的棋局，因此能产生涌现现象的复杂系统一定是一个开放系统，能够与环境进行物质、能量、信息的交换。系统涌现不仅仅是生成主体之间的非线性相互作用，而且一定需要环境的参与，需要系统与环境的整合，使系统与环境建立稳定有序的互动互应关系。“不能只从系统内部考察涌现问题，整体涌现性也是环境塑造系统的结果”。③

生成主体只是提供了涌现生成的种子，非线性相互作用、自组织、受限生成过程等，都是系统涌现的内在逻辑机制，仅仅有这些，涌现还不可能产生，还需要合适的外在条件。就如杰克手中的一颗葡萄种子，种子的基因使生化作用按照某种规则一步步地展开，从而决定了有机体的成长和发育。但只有当杰克把种子播种到土地中，并给予浇水、施肥等外在条件，才能出现美丽的葡萄藤蔓，慢

①约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹，译.上海：上海科技出版社，2001：143-144.

②约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹，译.上海：上海科技出版社，2001：2.

③苗东升.系统科学精要[M].北京：中国人民大学出版社，2006：60.

慢地变成了一颗成熟的巨大葡萄树，并最后结出丰硕的果实。用马克思主义哲学的话来说，任何事物的产生和发展都需要内因和外因的相互结合，内因是根据，外因是条件，外因通过内因而起作用。杰克手中的种子只有与土壤、气候等外在条件结合，才能真正结出硕果。如果只有种子或只有土壤，都不可能涌现出葡萄来。

涌现能够从无到有、由小生大，似乎违反了物质守恒、能量守恒定律，但因为它是开放系统，能够吸收系统外的物质和能量，所以能够由小小的种子，或者说由生成主体逐渐展开，涌现生成出各种复杂的现象。系统环境提供系统生存发展的资源，并施加一定的限制和压力，因此对系统的生成、运行、演化的评价和选择起到一定的作用，并迫使系统以适应环境为标准来整合组分，组织自己，改变自己。环境单一的系统不可能形成丰富多样的涌现现象。充满多样性、差异性、复杂性的环境塑造出来的系统必定呈现丰富、多样、复杂的整体涌现性。所谓环境塑造系统的内容极其丰富，包括组分之间资源分配和压力分担的方式，不同组分之间、系统与环境之间如何交换物质、能量、信息，等等。①

系统的环境是复杂多变、丰富多样的，例如一颗葡萄种子可以在不同的环境中生长，经验丰富的棋手可以面对各种各样的棋手和棋局。这就要求生成主体必须具备学习能力，能够由一套机制或算法以识别来自环境的复杂信息。现实世界中系统环境蕴藏着无穷的未知和新奇，这就需要涌现主体努力学习，尝试把环境变化的经验进行积累、归纳和总结。一个复杂系统在与外部环境相互作用过程中，主动评价，适应环境，并形成适宜生存的形态，这一过程就是系统学习的过程。一个复杂系统之所以能够适应全新环境，是因为它内部具有多种多样的组分，并通过复杂关系联系在一起，具有协调调整相互关系的能力。

复杂系统通过学习，才能总结出未来的行为模式和规律，学习如何行动，才能预测未来，并运用总结出来的行为模式来指导、应对和处理来自环境的各种复杂情况。一个不具备学习能力的生成

①苗东升.系统科学精要[M].北京:中国人民大学出版社,2006:60.

主体,不可能适应复杂的环境,也就不可能产生真正的涌现现象。通过学习,生成主体根据环境的变化进行算法调整,不断地将环境信息和系统算法进行重新组织和建构。所以,霍兰说:"对学习的进一步理解,将有利于对涌现现象进行深入研究。"①

学习能力还只是生成主体对环境变化的一种认识,还只是一种被动的适应。涌现实际上是复杂系统通过改变自身来适应外部环境变化的一种机制。生成主体面对环境,不会一成不变地完全按照预先确定的算法,完全按照自身的结构,生硬地应对环境的挑战。主体能够识别和学习,而且将根据环境信息,改变自身的生成算法,并对系统结构进行调整,以应对和适应变幻的外在环境。只有能够有效应对复杂环境的生成系统,才能通过学习,改变受限生成过程的公式化的模型,制定合适的环境策略。"这种改变将使受限生成过程可以直接包含几何结构的改变,即允许受限生成过程本身自行控制几何结构的改变,从而变动的主体能够实际改变受限生成过程中的联系,以反映它们之间相互作用变化的方式。"涌现系统的种子,霍兰把它叫做主体,强调的就是主动性和适应性,从根源上、内因上来说,它就具备了这样的学习、适应的先决条件。霍兰虽然在其涌现理论中没有像在其复杂适应系统理论中那样重点探讨复杂系统的适应性,但他在研究西洋跳棋、神经网络这些案例时,特别强调学习和适应能力,并重点研究了具有可变结构的受限生成过程的模型,对涌现系统适应建构能力进行了理论的探索。

当然,涌现系统并非如雕塑家把石头雕刻成塑像那样单向被动地接受环境的塑造,环境在塑造系统的同时也在或多或少被系统改变着,进而又改变环境对系统的后续塑造。系统和环境是互相塑造的,在互相塑造中寻找平衡点,以求达成共生共荣。② 这也就是说,涌现生成的过程事实上是涌现主体与环境的双向建构过程。由此看来,大自然也是一个建构主义者!

---

①约翰·H. 霍兰. 涌现——从混沌到有序[M]. 陈禹,译. 上海:上海科技出版社,2001:56.
②苗东升. 系统科学精要[M]. 北京:中国人民大学出版社,2006:60.

第四节 涌现生成方法应用实例:人工生命

人工生命的构造过程基本上体现了涌现生成方法,是涌现生成方法的应用和体现。这里我们选择人工生命研究的几个典型模型:L-系统、元胞自动机和人工生物形态,试图从中看出涌现生成方法在其中的具体应用。

“人工生命”,顾名思义,就是“人造生命”,不是“自然生命”。而“自然生命”通常意味着自然繁殖、生长、进化的地球上的生物,如人及各种动物、植物。“人工生命是研究怎样通过抽取生物现象中的基本动态规律来理解生命,并且在物理媒体上,如计算机,重建这些现象,使它们成为一种新的实验方式和受控操纵。”①

人工生命诞生于美国圣菲研究所,但它智慧的种子可以追溯到阿兰·图灵(A. Turing)和约翰·冯·诺伊曼。图灵证明生物的胚胎发育可以用计算的方法加以研究。冯·诺伊曼则试图用计算的方法描述生物自我繁殖的逻辑形式。到了20世纪70年代和80年代,随着计算机速度的大幅度提高以及个人计算机的普及,在康韦、沃弗拉姆等人有关“生命游戏”研究的基础上,朗顿发现,处于“混沌边缘”的元胞自动机既有足够的稳定性存储信息,又有足够的流动性来传递信息。如果我们在计算机或其他媒质中建立起产生“混沌边缘”的一定规则,那么,从这些规则中就有可能浮现出生命来。由于这种生命不同于地球上以碳为基础的生命,因此朗顿把它称为“人工生命”。

一、L-系统

涌现生成方法典型应用的第一个案例是L-系统。② L-系统是一种用迭代方式描述动态涌现生成过程的方法,它由荷兰数学家

①涂序彦,等.人工生命及应用[M].北京:北京邮电大学出版社.2004:134.

②该案例引自李建会.生命和计算:人工生命的生命观研究[D]·北京大学博士学位论文,2002.以及许国志.系统科学[C].上海:上海科技教育出版社,2000.

林登迈尔(A. Lindenmayer)为描述和模拟植物的生长过程而创立的。L-系统的方法是按照生物体生长发育的机制而设计的。按照现代生物学的观点,生物的涌现生成和生长发育是由细胞中包含的遗传基因信息决定的,而基因信息(基因型)决定生物体的最终形态(表现型)。涌现生成的过程中,每个细胞的行为和形状取决于哪段基因信息得到表达,而后者取决于周围细胞中哪些基因信息得到表达。①

L-系统中决定系统行为的法则都是局部的,每个单元的行为只与其周围单元行为有关。系统作为众多单元的集合体都表现出一定的宏观功能和形态,整体具有鲜明涌现生成的特征。

(一)简单线性 L-系统

假设某一 L-系统有下面的迭代规则决定:①a→cb;②b→a;③c→da;④d→c,其中 a,b,c,d 代表元素的状态。如果初始的状态是 a,运用上述规则,我们可以得到下面的涌现生成结果(表 2.2),在该表中可以看出从简单局部的迭代规则可以涌现出异常复杂的结构。

表 2.2 简单线性 L-系统生长过程表

时 间	结 构	应用规则
0	a	种子元素(初始状态)
1	cb	规则 1
2	daa	规则 3,2
3	ccbcb	规则 4,1,1
4	dadaadaa	规则 3,3,2,3,2
…	…	…

(二)分枝 L-系统

如果我们赋予符号以意义,就可以用 L-系统模拟植物的分枝

①许国志.系统科学[M].上海:上海科技教育出版社,2000:128.

从主茎上分出的过程。① 让( )和[ ]分别表示左和右分枝,括号内的符号串表示分枝结构本身,那么,产生枝条的语法规则如下:①a→c[b]d;②b→a;③c→c;④d→c(e)a;⑤e→d。假设起始状态是a,应用上述规则,我们可以发展出以下的序列结构(表2.3):

表2.3 分枝L-系统生长过程表

时 间	结 构	应用规则
0	a	种子元素(初始状态)
1	c[b]d	规则1
2	c[a]c(e)a	规则3,2,4
3	c[c[b]d]c[d]c[b]d	规则3,1,3,5,1
…	…	…

从上述表格中,我们也可以看出简单局部的迭代涌现复杂结构的受限生成过程。我们还可以把上述涌现生成过程表示为一种树形结构(图2.7)。

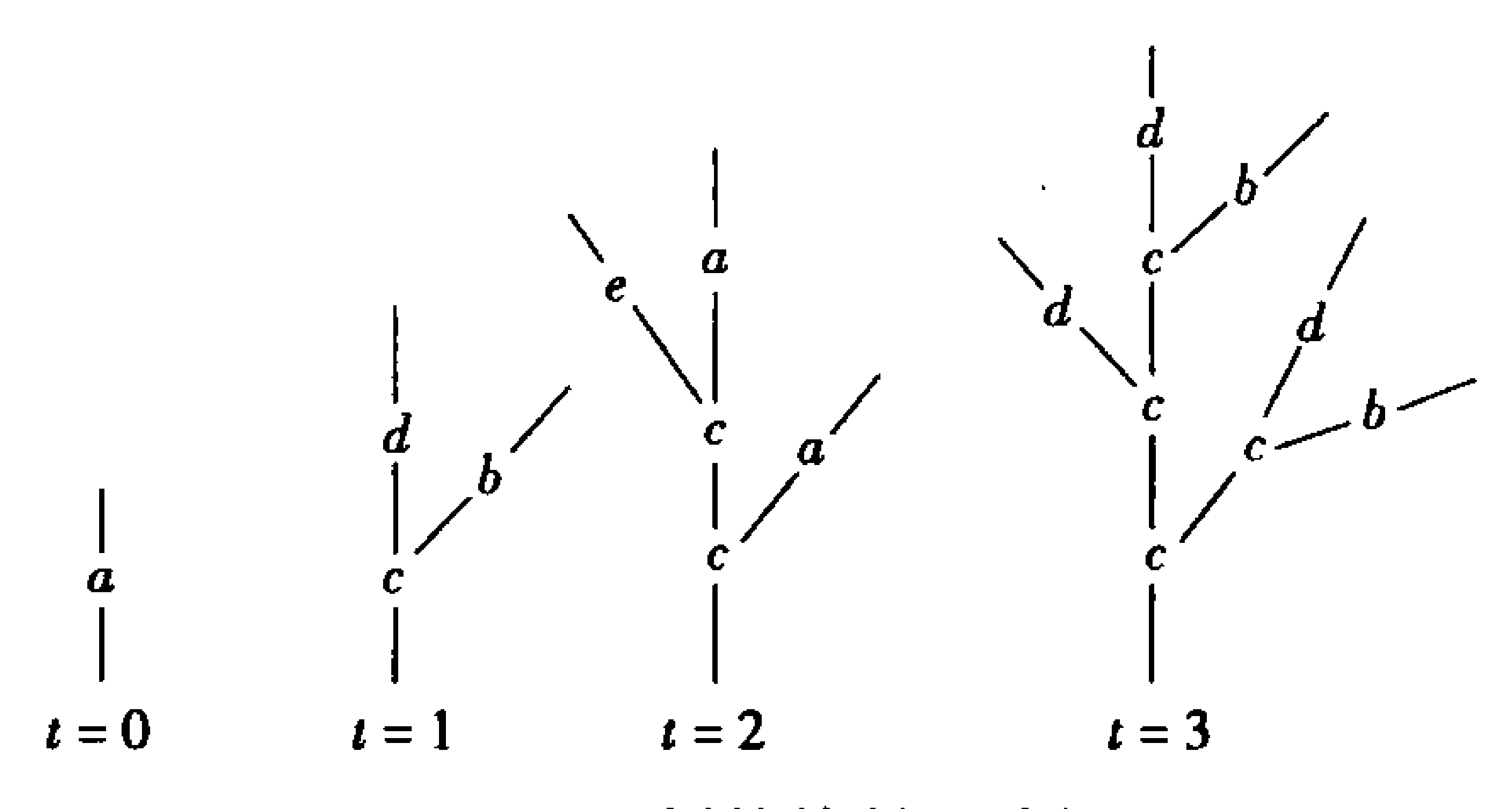


图2.7 树枝的涌现过程

二、人工生物形态

涌现生成方法典型应用的第二个案例是人工生物形态研究。② 人工生物形态研究是英国牛津大学著名生物学家道金斯(Richard

①李建会. 生命和计算:人工生命的生命观研究[D]. 北京大学博士学位论文,2002:34.

②该案例引自约翰·L.卡斯蒂. 虚实世界[M]. 王千祥,权利宁,译. 上海:上海科技教育出版社,1998:42-46.

Dawkins)的杰作,并在 1987 年第一届人工生命国际研讨会上做了引人注目的演示,用来展示了基因突变过程如何与自然选择一起"繁殖"生物形态的过程。

在生物形态王国中,一切开始于一种线条画,然后这个骨架对象按照一组规则进行变换,产生一个后代谱系,每一个谱系都由一个遗传突变所决定。研究人员扮演大自然的角色,选择其中的一个,使其产生后代,然后多次重复进行上述突变和选择的过程。图 2.8 显示了道金斯的一个演化实验,图 2.9 描绘了上述过程的最终形态。① 道金斯这些以假乱真的人工生物形态都是通过对最初形式(初始种子)反复地应用若干条简单规则而得到的(受限生成)。

道金斯之后,皮克奥弗(C. Pickover)创造出更简单的构造人工

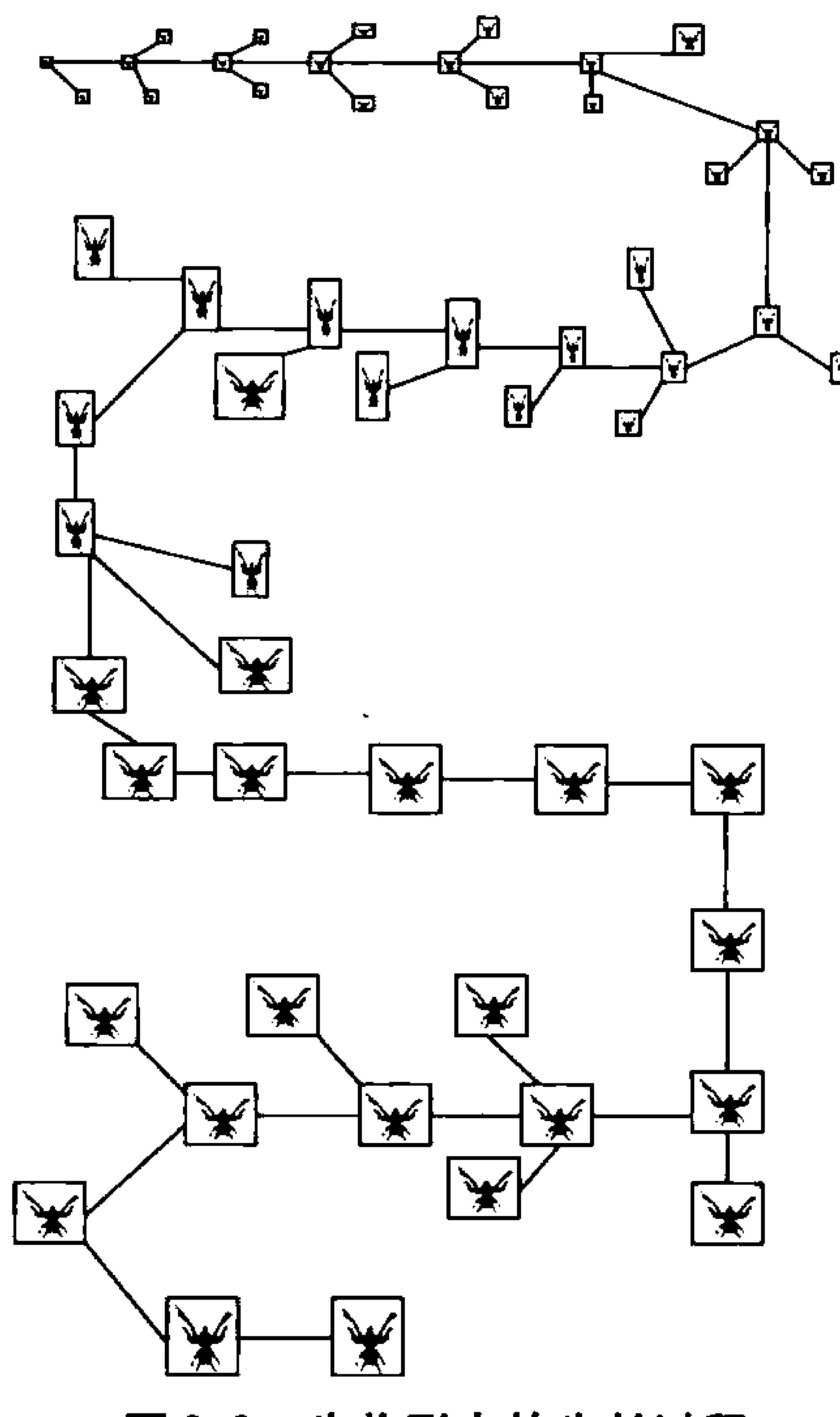


图 2.8 生物形态的生长过程

①约翰·L. 卡斯蒂. 虚实世界[M]. 王千祥,权利宁,译. 上海:上海科技教育出版社,1998:42-43.



图 2.9　人工生态形态图例

生物形态的方法。在 $x-y$ 平面上选取一个初始点，然后根据下列规则确定下一个点，若当前点的平面坐标为 (x,y)，则下一个点的坐标为：

$$x \to x^3 - 3xy^2 + \frac{1}{2}$$

$$y \to 3x^2y - y^3$$

通过这样的反复迭代过程，不断使用该规则产生新的坐标点，就能产生出不同形状的人工生物形态。迭代过程中，初始点被称为种子，迭代规则就是发生器，这种迭代过程实际就是一种受限生成过程。

选择不同的初始种子，经过受限生成过程，可以得到不同的生物形态，图 2.10 的形状与放射虫的结构极为相似。① 图 2.11 则显示了用相同的受限生成方法产生的不同类型的生物形态，它们只

①约翰 · L. 卡斯蒂. 虚实世界[M]. 王千祥，权利宁，译. 上海：上海科技教育出版社，1998：45.

是简单地变换产生黑点的特定规则。① 从人工生物形态研究中可见，外观极为复杂的几何形状与形式可以诞生于极为简单的生成规则，人工生物形态的受限生成是涌现生成方法的典型应用案例。

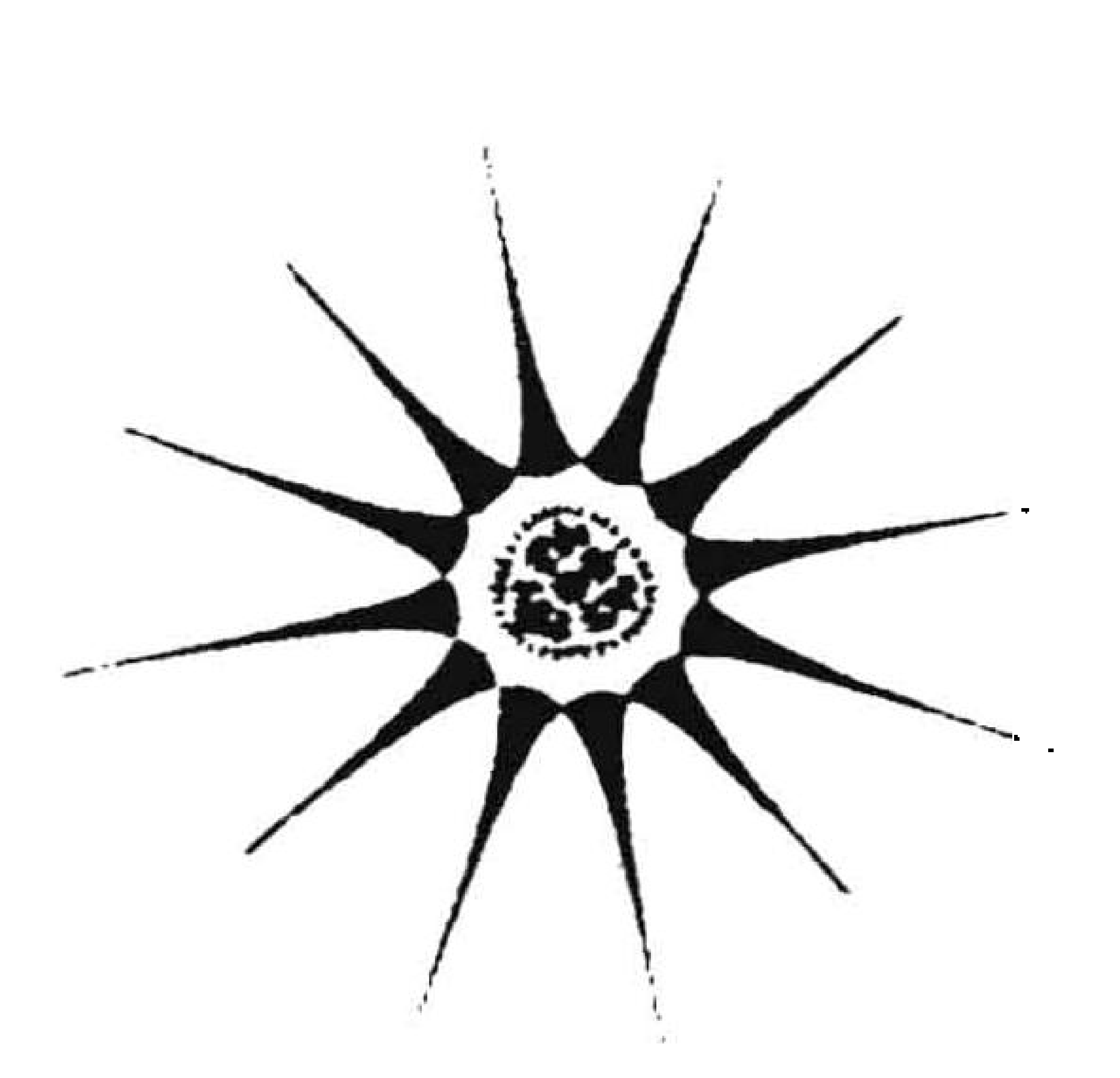


图 2.10 放射虫生物形态

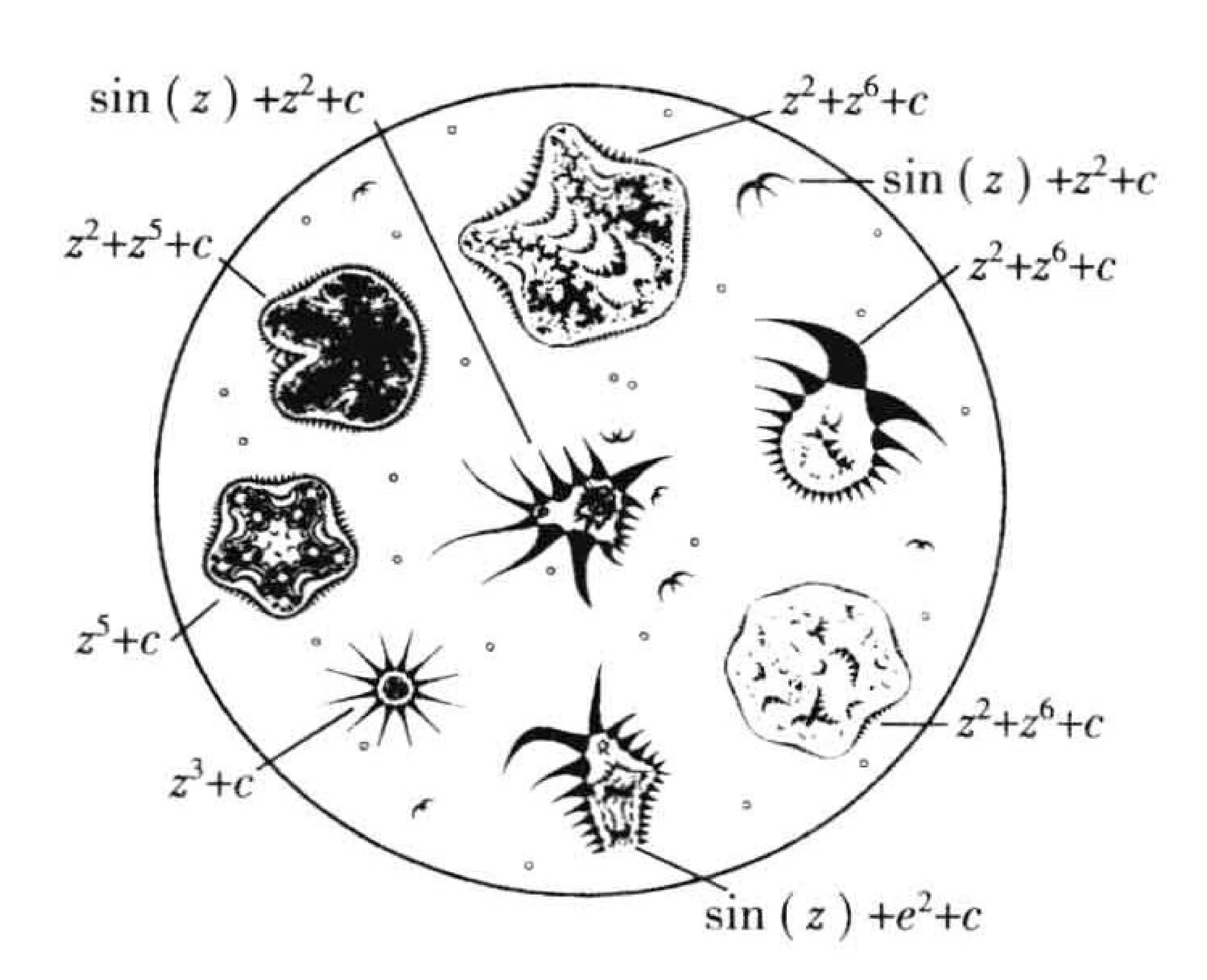


图 2.11 由迭代所产生的不同生物形态

三、元胞自动机

自繁殖的元胞自动机提供了递归应用一组简单规则产生复杂涌现行为的第三个典型案例。② 著名数学家乌拉姆与冯·诺依曼最先用元胞自动机从简单规则产生复杂行为，但由于有 29 种状态，难于在计算机中实现。康韦（John Conway）设计并命名了一种被称为“生命”的最简单并能够在计算机中实现的元胞自动机。尽管“生命”很简单，但却提供了一些有关涌现的精彩例子。霍兰完整地定义这个元胞自动机，并以滑翔机为例子进行了详细讨论。按照受限生成过程的术语，“生命”是由单一机制的副本形成的，这种机制仅有 1 和 0 两种状态。为了便于描述，我们可以假定当相应机制的状态为 1 时，单元就被粒子占据：否则，这个单元就是空的。用于连接的方格是一个方形阵列，有 8 个其他的方格围绕 1 个方格并与之相连。也就是说，每一个结点有 8 个与之直接相连的邻结点（图 2.12）。③

---

①约翰·L.卡斯蒂.虚实世界[M].王千祥，权利宁，译.上海：上海科技教育出版社，1998：46.

②约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹，译.上海：上海科技出版社，2006：139-143.

③约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹，译.上海：上海科技出版社，2006：140.

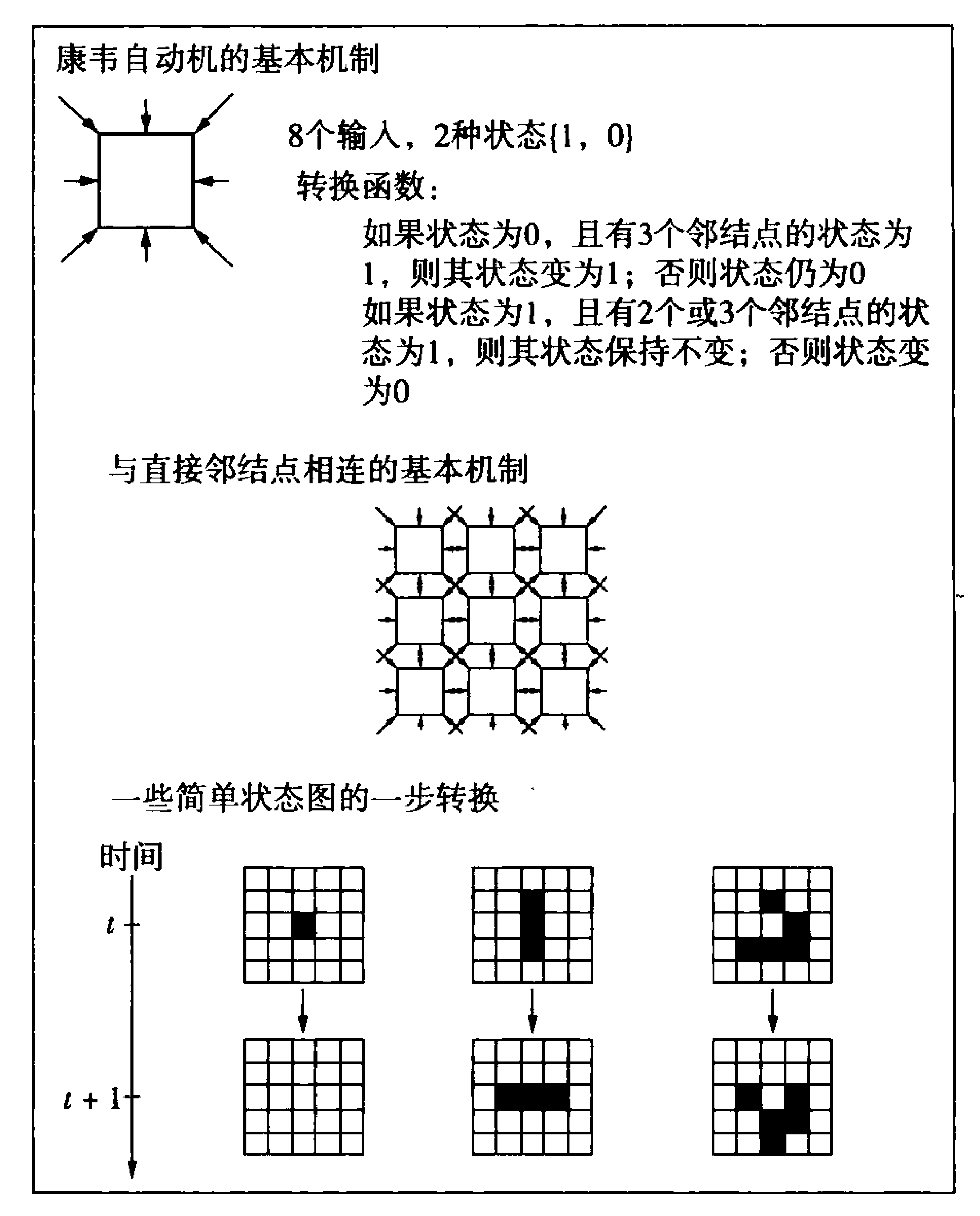


图2.12　康韦自动机

在一个二维平面方格中，布满着"活着的"的黑方块和"死了的"白方块，最初的图案可以由游戏者任意摆布。但一旦开始运作这个游戏后，这些方块就会根据很少几条简单规则活过来或死过去。每一代的每一个方块首先要环顾其四周的近邻，如果近邻中有太多活着的方块，则这个方块的下一代就会因为太拥挤而死去；如果其近邻中存活者过少，则这个方块就会因为孤独而死去。但如果其近邻中存有两个或三个"活着的"方块，则比例恰到好处，这个方块的下一代就能存活下去。也就是说，要么是这下一代已经活着，能够继续存活下去，如果不是这样，就会产生新的一代。规则就这么简单。这些规则只是一种漫画式的生物学。然而"生命游戏"模型的奇妙之处就在于此，当我们将这些简单的规则变成一个计算机程序之后，就好像真的能够让计算机屏幕"活"起来。如

果用心观察,就可以看到计算机屏幕沸腾着各种活动,就像是在一台显微镜下观察池塘里一滴水中的微生物一样。开始时你可以随意设置一些活着的方块,可以观察到它们如何很快自组织成各种连贯一致的结构。其中有的结构翻滚不已,有的结构的振荡犹如野兽呼吸。你还会发现"滑翔机",即一小簇以常速滑过屏幕的活细胞。你还会看到稳定的发射出新的滑翔机的"滑翔机枪",以及在那里气闲心定的吞噬滑翔机的其他结构。每重玩一次,出现在屏幕上的图案都会有所不同,无法穷尽其可能性。

下面描述作为受限生成过程的转换函数。若单元是空的(状态值为0),且与之直接相邻的8个结点中仅有3个是被占据的(状态值为1),则在下一时刻,该单元就被占据;否则该单元就仍保持空的状态。若单元本身就是被占据的,且与之直接相邻的8个结点中有2个或3个是被占据的,其他的结点保持空的状态,则在下一时刻,该单元仍保持被占据的状态;否则就变成空的状态。这一描述包含了全部的可能性。

康韦自动机中有一个简单的、变动的、自身永恒的称为滑翔机的图案。该图案包含一个有5个单元被占据的图案,这5个单元四周环绕着空单元(参见图2.13)。[①] 这里的转换函数用来描述连续时间段上图案产生的一系列变化。虽然每次变化都有5个单元被占据,但是图案的形状是规则改变的,并且在空间上还呈现出对角移动的特性。在经过4个时间段的间隔后,图案重现了,此时它沿对角线向下移动了一个单元(如图2.13所示),即这5个单元组成的形状整体地向右下角移动了一个单元。如果此时继续,图案的形状会呈现出规律性的变换。只要"滑翔机"不遇到其他被占据单元的图案,它就会一直斜着沿对角线向下滑过这些方格。

虽然滑翔机的例子非常简单,但它还是表现出很多关于涌现现象的特性。滑翔机并不是由一些被约束的固定的基本粒子组成,也不是按照一个轨迹在空间移动,而是粒子不断被创建和删除的过程,这个过程生成了滑翔机。尽管图案中的元素是持续改变

①约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹,译.上海:上海科技出版社,2006:141.

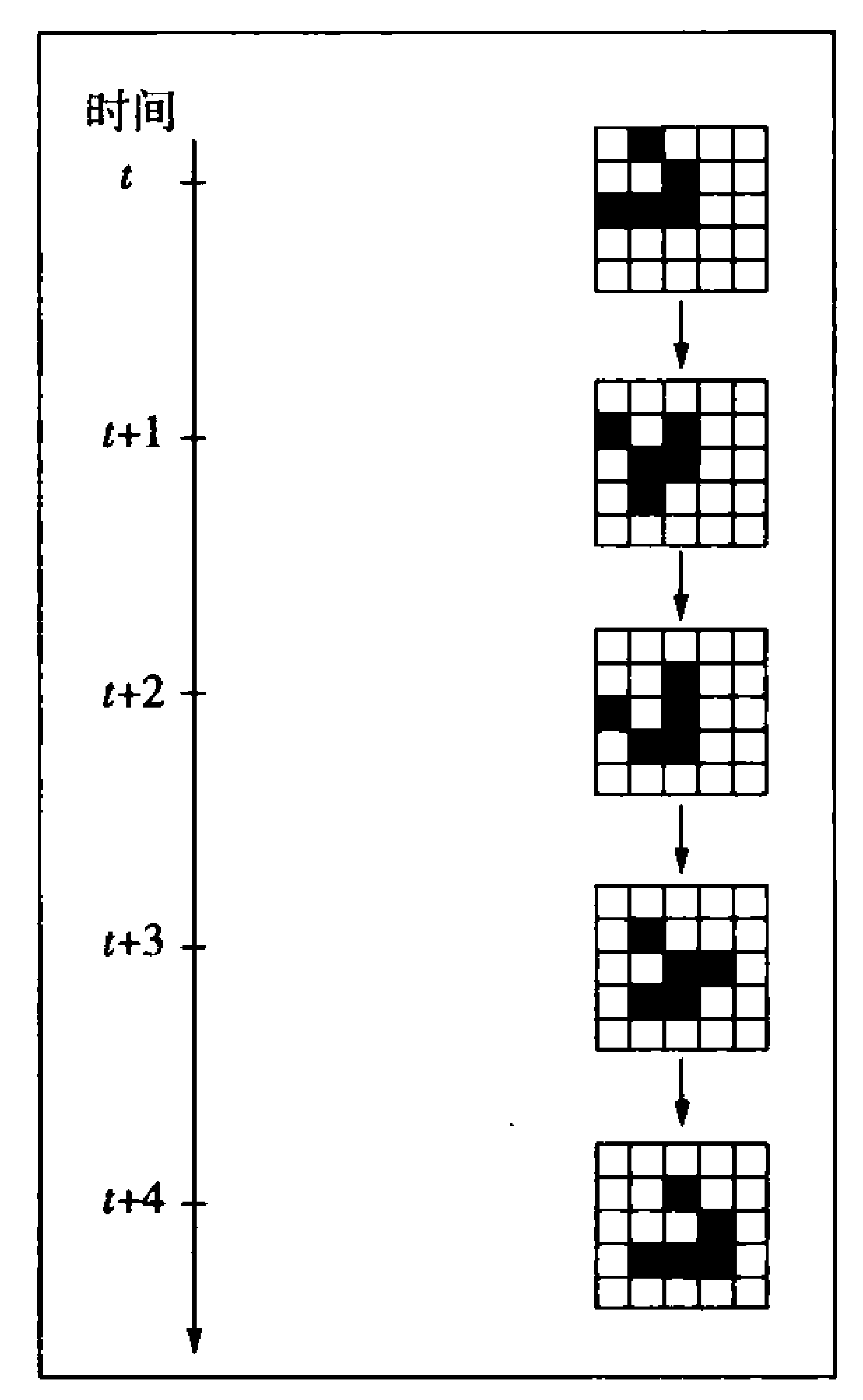


图 2.13 康韦自动机中滑翔机
状态图的连续转换过程

的,图案本身却具有很好的稳定性,这使我们回想起礁石前由激流形成的驻波。但滑翔机的例子比形状固定的驻波更复杂,这是因为前者在变动的过程中要不断改变形状,而且并不固定在某一个特定的位置。此外,滑翔机及其滑翔动作遵循着该系统中的简单规则。

从上述人工生命三个典型的涌现生成案例中进一步印证了涌现生成方法的一些基本结论:①简单得近乎荒谬的规则(转换函数)能够生成固有的涌现现象;②涌现现象是以相互作用为中心的,它比单个行为的简单累加要复杂得多;③稳定的涌现现象可以作为更复杂涌现现象的组成部分。①

①约翰·H.霍兰.涌现——从混沌到有序[M].陈禹,译.上海:上海科技出版社,2006:143.

第三章

适应维生方法

——复杂组织维生机理分析

组织涌现生成之后，除了那些立即死亡解体的之外，一般都进入生长发育阶段，直到死亡解体之前都维持着组织的生命，也就是说，组织一般都有一定的自我维持其基本结构、特性和行为模式的能力，具有适应环境的能力，这种能力被称为维生能力。① 自然界的生命组织以及其他许多组织都具有生命周期，都能够在复杂的外在环境下维持生存，也就是说，都具有维生能力。科学家和哲学家们对此都在探索其中的奥秘，但除了科学家特别是生物学家的一些零星成果之外，对生命组织的这种能力还没有比较系统的科学解释。哲学家们则停留在一些哲学式的猜想，缺乏科学的依据。霍兰提出的复杂适应系统理论（Complex Adaptive System，简称CAS）则为揭示组织的维生能力提出了一套比较系统的科学理论，也为我们探索组织的维生机制的方法论提供了科学的依据。

第一节　复杂适应系统理论的兴起

生命组织是构成自然界的重要组织，然而人们对其认识却一直充满神秘色彩，科学家、哲学家甚至各种宗教都在对其做出各种解释，但生命的机理仍然隐藏在黑暗之中。难怪大科学家薛定谔

①苗东升．系统科学精要［M］．2版．北京：中国人民大学出版社，2006：40.

会以“生命是什么”这样一个问题作为其书名。在生命机理中，除了生命组织的诞生是一个奇迹之外，面对各种复杂的外在环境，生命依然能够生长繁育，能够傲然挺立，其中的维生能力令人称奇的同时，也让我们充满着谜团。大自然是复杂的，是千变万化的，但是生命组织能够生存和适应，所以维生机理中，适应性是一个重要构成和重要能力。虽然直觉上我们比较容易发现适应性是生命维生的一个重要机理，但要从学理上阐述，并构成科学理论却并不容易，这也成为美国学者霍兰一生诸多科学贡献中的一个重要贡献。

霍兰创立复杂适应系统理论与位于美国新墨西哥州的一所非赢利性的交叉科学研究所——圣菲研究所（以下简称 SFI）有着密切的关系。[①] SFI 成立之初，成员们只是为了打破传统的学科界线，但如何打破，却没有一个明确的方案。通过大家的交流、讨论和探索，一致认识到必须从方法论上来一场革命，即从传统的还原论超越出来，结合整体论的方法，在还原论和整体论之间保持必要的张力。因此，大家慢慢地将目光聚集到了复杂性科学的探索上，也就是说，复杂性成了 SFI 的共同话语，复杂性科学成了全所共同的大方向。正是通过复杂性这个共同目标，将常驻人员、流动人员聚集到一起，正是为了探索复杂性，来自五湖四海的学者走到了美国南部小城圣非。复杂性是将大家凝聚到一起的聚合剂。

虽然 SFI 有一些主要的研究方向，但每个研究人员并不限于一个课题。只要对某一共同的问题感兴趣，都可以参加到某个课题中去，也可以随时离开不感兴趣的课题。这种看似松散的学术体制实际上有利于学术发展，其自由的氛围更鼓励各种各样的思想交流与融合，尤其不会限制年轻人学术思想和思维方式的发展。SFI 的格局正如该所的研究对象（复杂性）一样：开放、动态并有着复杂的相互作用。

SFI 每年召开的正式会议一般会有几十次（不包括那些非正式会议），几乎每天都会有各种各样的关于复杂性的报告和讨论。来自世界各地的研究人员因为某个共同的话题频繁但短期地聚集到

---

①黄欣荣，等. 圣菲研究所：一种科研新体制[J]. 科学学与科学技术管理，2004(4).

SFI。其中有一个从1994年SFI成立10周年开始，每年召开一次的重要学术会议——乌拉姆系列讲座(Ulam Lectures)。1993年秋天，SFI所长纳普(Ed Knapp)邀请霍兰在1994年夏天第一次举办的乌拉姆讲座上做重要演讲，并打算将讲稿以专著的形式出版发行。霍兰为了完成这个任务，在他家刚落成的密西根湖边别墅上整理多年来对复杂性、适应性和生命的维生能力等进行的比较系统、全面和深入的思考。诺贝尔物理学奖获得者盖尔曼(Murray Gell-Mann)要求霍兰他们这些复杂性爱好者们必须拿出系统化、有说服力的复杂性科学成果，霍兰在此要求的激励、挑战下，将复杂性研究的重点放在了一个侧面——围绕"适应性(adaptation)"的复杂性上。霍兰认为，由适应性产生的复杂性极大地阻碍了我们去解决当今世界存在的一些重大的问题，因此他把精力集中在这个问题的研究和解决上，并由此提出"适应性造就复杂性"这样一个中心思想。霍兰把这一领域的研究命名为"复杂适应系统(CAS)"研究①，以总结对这样一门尚未成熟的学科的一些比较一致、系统的看法。在SFI的乌拉姆系列讲座的首次报告会上，霍兰以"适应性造就复杂性"为题做了演讲。在这个报告中，他在多年研究分支系统的成果基础上，提出了关于CAS的比较完整的理论，并以《隐秩序——适应性造就复杂性》作为著作的名称。② SFI成立之初的目标是建立关于复杂性的一元化理论，后来受霍兰这次演讲的影响，把注意力集中于CAS理论上。如今，CAS理论成为SFI的理论支柱之一，它已成为解释复杂系统机制的一种重要理论，在各个领域得到了广泛的应用。CAS理论是复杂性科学理论的一个重要分支，并在世界复杂性研究中产生了重要影响。20世纪90年代末，陈禹等学者把它系统引入中国，并做了大量的研究，因此在我国也

①约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧，韩晖，译.上海：上海科技教育出版社，2000：序言.

②约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧，韩晖，译.上海：上海科技教育出版社，2000.

产生了重要的影响，并得到了广泛的应用。①

CAS 理论的提出，是从对系统演化规律的思考引起的。复杂性研究的一个重要方面，是对复杂性的产生机制的研究，CAS 理论就是对这个问题的一种回答。简单地说，其基本思想可以用一句话概括为："适应性造就复杂性。"当然，这是产生复杂性的机制之一，而不是复杂性的唯一来源，CAS 理论完全不排除还可能会有其他的产生复杂性的机制与渠道。然而，大量事实表明，由适应性产生的复杂性，即所谓 CAS 确实是一大类十分重要的、非常常见的复杂系统，它从一个侧面概括了生物、生态、经济、社会等一大批重要系统的共同特点。关于 CAS 的理论，无疑是现代系统科学的一个富有启发性的、值得重视的领域。作为复杂系统中重要的一类，CAS 的建模和研究目前已经成为一个热点。

霍兰在《隐秩序》一书的序言中写道："本书讨论的中心议题，是近来备受关注的一个领域：复杂性……在写这本书的过程中，我把重点放在复杂性的一个侧面——围绕'适应性'的复杂性上，目前这一领域被称为'复杂适应系统'……我认为，由适应性产生的复杂性极大地阻碍了我们去解决当今世界存在的一些重大问题。"

按照某些传统的看法，复杂性主要来自系统的外部。例如，结构的复杂性，系统内部的分工或分化，常常被归之于外部力量（如神）的创造。系统行为之复杂和不可预测，也总是归之于外部的随机性的干扰。这种想法可以说是由来已久，近几百年发展起来的近代科学，回答了以前的人类所不知道的许多问题，然而，对于复杂性究竟是从何而来的这个基本问题，却似乎没有什么进步。而且，由于对热力学第二定律的片面理解，认为任何事物的发展都按照这样一条道路：从不对称到对称，从有结构到无结构，从有差别到无差别，一句话，从复杂到简单。显然，这种认识与丰富多彩的大千世界是完全不相容的。然而，囿于还原论的束缚，人们对于这

---

①陈禹. 复杂适应系统理论及其应用[A]//许国志. 系统科学. 上海：上海科技教育出版社，2000：250-295. 国内对复杂适应系统理论理解比较系统和深入的是陈禹，他的理解比较全面、准确，为我们了解、掌握这门新学科奠定了很好的基础。本章第一、二节较多地引用了他的研究，特此说明并致谢。

种矛盾视而不见,仍然不得不把复杂性的来源归之于神秘的、外来的力量。

现代系统科学的发展打破了这种形而上学的看法,特别是对于自组织现象的研究,引导人们从系统内部寻找复杂性的来源。然而,最初研究的自组织现象,在某种意义上还是比较简单的。这些系统中的元素(或个体)还是被动的、"死的",并没有自身的目的和主动性。这就使得这一阶段的理论与方法,难以有效地应用到生物、生态、经济、社会等领域。

CAS 理论正是在这方面向前迈进了一大步,即把系统的成员看作是具有自身目的与主动性的、积极的"活的"主体。更重要的是,CAS 理论认为,正是这种主动性以及它与环境的反复的、相互的作用,才是系统发展和进化的基本动因。宏观的变化和个体分化都可以从个体的行为规律中找到根源。霍兰把个体与环境之间这种主动的、反复的交互作用用"适应性"一词加以概括。这就是 CAS 理论的基本思想——适应性造就复杂性。

第二节　复杂适应系统理论的基本内容

CAS 理论的基本思想可以概述如下:我们把系统中的成员称为具有适应性的主体(adaptive agent),简称为主体。所谓具有适应性,就是指它能够与环境以及其他主体进行交互作用。主体在这种持续不断的交互作用的过程中,不断地"学习"或"积累经验",并且根据学到的经验改变自身的结构和行为方式,整个宏观系统的演变或进化,包括新层次的产生,分化和多样性的出现,新的、聚合而成的、更大的主体的出现等等,都是在这个基础上逐步派生出来的。[①]霍兰的 CAS 理论还不是特别完整,但已经初步显现出其理论体系。

①陈禹.复杂适应系统理论及其应用[A]//许国志.系统科学.上海:上海科技教育出版社,2000:252.

一、刻画 CAS 理论的基本工具

为了刻画 CAS 理论,霍兰首先提出了一组规则(因果规则)、两个基本概念(主体、适应性)、三套运作机制(标识、内部模型、积木)、四个通用特性(聚集、非线性、流、多样性),在此基础上构建了单个主体的适应学习机制(主体适应性刻画)和宏观发展模型(回声模型)。

(一)主体、适应性、规则

在系统科学的早期阶段,组成系统的个体一般称为元素、部分或子系统,它完全是由被动的、死的构件构成。例如在控制系统中,系统的最小部分是机械、电子元器件,属于没有个性和主动性的器物,服从物理规律。在耗散结构论、协同学等自组织理论中,系统的元素是物质原子或分子。这些原子或分子虽然在不断运动,但没有个性,没有主动性和适应性,遵循统计规律。霍兰在 CAS 理论中采用了 adaptive agent 这个词,也就是具有适应能力的个体,中文把它译为“具有适应能力的主体”或“适应性主体”,简称为主体,以强调构成 CAS 的最基本构件是具有一定生命特征的构件,它具有主动性、适应性,具有自己的目标、内部结构和生存动力。例如,在社会系统中的人,经济系统中的公司组织,免疫系统的各种抗体,生态系统的各种动植物均可以被称为主体。霍兰所用的 agent 这个词本来是经济学中的用语,表示代理人或代理商的意思。霍兰借用这个词,明显地表示,经济系统是他建立 CAS 理论时心目中的主要背景之一。其实在构建 CAS 理论时,霍兰时时不忘经济学的各种案例,并把其理论及时应用于经济学领域。可以说经济学是 CAS 理论的主要来源,也是 CAS 理论的应用试验场。

CAS 理论认为主体具有主动性,富有活动性和适应性。主体具有的适应性是指它本身能够与环境以及其他主体进行持续不断的交互作用,从中不断地“学习”或“积累经验”“增长知识”,并能够利用积累的经验改变自身的结构和行为方式,以适应环境的变化以及和其他主体的协调一致,并能促进整个系统发展、演化或进化。霍兰将主体与环境以及其他个体间的主动、持续地交互作用,

以促进整个宏观系统演化或进化所具有的特性称为适应性。①适应性主体的根本特性是具有主动性，能够感受环境，自我学习，主动调整、改变自身，以便能动地适应环境。②大量具有主动性的主体在相互作用中努力地相互适应，寻找和创建能够相互适应并共同适应外部环境所需要的行为规则，有这样的适应性主体整合而成的系统，就是 CAS。

具有主动性的系统往往充满着活力和魅力，但传统科学却因为没有适当的描述工具而不得不放弃了对这类系统的深入研究，从而为活力论提供了一个空间。近代科学兴起的重要标志是用受控实验来揭示自然的奥秘，它要求一切科学理论成果都用受控实验来检验，而受控实验本质上可以归为寻找某一现象发生的充分必要条件。对于发现事物之间确定性的联系，它与寻找因果关系式是同义的，而对不确定的随机事件，则是探讨其统计规律。“因果解释和概率解释是科学自然图像的框架”。③通过一定的变换，概率解释也可以变为因果解释的形式，因此被称为广义因果律。具有主动性的主体因为很难用传统的因果规律来解释，特别是适应性、学习机制等，因此成了活力论或伪科学的领地，成了科学的光芒难于照亮的死角。生命组织与因果性似乎成了完全对立的关系。

霍兰构建的适应性主体则跳出了这种对立关系，从微观机制来说，符合科学所要求的因果性，从宏观功能来说又具有主动性和适应性。霍兰首先从描述单个主体的性能开始，以搞清大量主体的相互作用以及由此产生的适应性。他将主体的行为看成是由一组规则决定的，而这里的规则就是完全符合因果性的刺激-响应规则(stimulus-response rules)。④IF(若)刺激 s 发生，THEN(则)作出响应 r。如果(得到环境刺激的信息)则(发出适当的响应行动指令

---

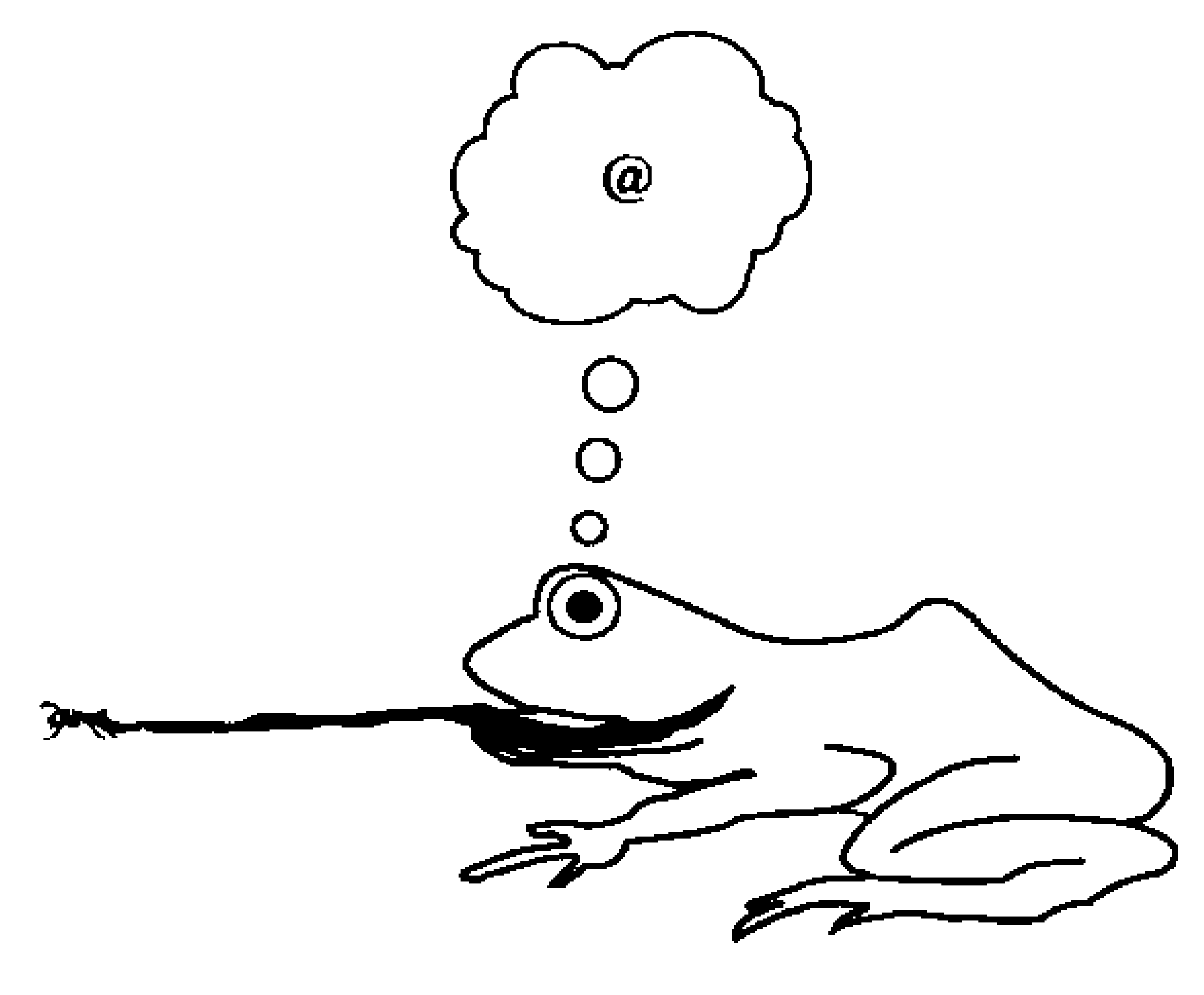
①郭士勇，等. 非线性科学与复杂性科学[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2006：185.

②苗东升. 系统科学精要[M]. 2 版. 北京：中国人民大学出版社，2006：210.

③金观涛. 系统的哲学[M]. 北京：新星出版社，2006：186.

④约翰·H. 霍兰. 隐秩序——适应性造就复杂性[M]. 周晓牧，韩晖，译. 上海：上海科技教育出版社，2000：7.

信息)。CAS理论把主体的适应性行为看成是由一组规则决定的,可以用通常的刺激-响应规则(输入-输出规则)来表达,刺激或输入反应环境的特征及其对主体的作用和限制,响应或输出体现主体的特征、行为能力及特点,两者的对应关系就是主体的适应行为规则。一系列这种“如果……则……”规则的集合,构成CAS的规则库。适应是CAS必不可少的条件,而所谓适应,其实就是主体调整自己的行为规则以应对环境刺激的过程。CAS建模的工作,主要都归结为选择和描述有关的刺激和响应。因为作为系统要素的主体的行为和策略都由此而定。对中枢神经系统中的主体(神经元)而言,刺激可以是到达每个神经元表面的脉冲,响应则是发出的脉冲。对免疫系统中的主体(抗体)来说刺激可以是入侵抗原表面的分子构型,响应则是对抗原表面的不同的黏着。对经济系统中的主体(公司)来说,刺激可以是原材料和货币,响应则是生产出来的产品。图3.1为青蛙的刺激-响应图示。①



IF瞄准小飞行物
THEN 发送 @
IF @
THEN 伸舌
消息(这里由未解释符号@表示)由装置内的未解释字符串所典型代表。

图3.1 青蛙的刺激-响应

总之,霍兰把CAS看成是由规则描述的、具有相互作用的主体构成的系统。这些主体随着经验的积累,靠不断变换其规则来适

---

①本章中的插图除了已特别指明出处之外,其他均引自:霍兰. 隐秩序——适应性造就复杂性[M]. 上海:上海科技教育出版社,2000. 因引用较多,本书中没有标明详细页码,特此说明。

应。在 CAS 中,任何特定的适应性主体所处环境的主要部分,都由其他适应性主体组成,所以,任何主体在适应上所做的努力就是要适应别的适应性主体。这个特征是 CAS 生成的复杂动态模式的主要来源。

(二)特性刻画

霍兰定义了 CAS 中适应性主体的概念,并采用规则描述主体的行为之后,又提出了七个新概念来更细致刻画 CAS 中主体的适应和维生、演化的过程,因为单独用主体这个概念尚无法完全表达出 CAS 理论的丰富内容。围绕主体这个最核心的概念,霍兰进一步提出了研究适应和演化过程中特别要注意的七个有关概念:聚集、非线性、流、多样性、标识、内部模型、积木。[①]在这七个概念中,前四个是个体的某种特性,它们将在适应和进化中发挥作用,而后三个则是个体与环境进行交流时的机制。

1. 聚集

俗话说,物以类聚,人以群分,分类和归类是研究问题的重要手段。在 CAS 研究中,聚集(aggregation)有两方面的含义。

第一个含义是指简化复杂系统的一种标准方法。我们往往把相似的事物聚集成类,例如树、汽车、银行、房子等,都是一大类事物的总称。人们很容易用这种方式分析那些相似的情形。从这个意义来说,聚集是我们建构模型的重要手段之一。

聚集的第二种含义是指主体通过"粘着(adhesion)"形成较大的所谓的多主体的聚集体(aggregation agent),这是高一级的主体——元主体(meta-agent)。由于个体具有这样的属性,它们可以在一定条件下,在双方彼此接受时,组成一个新的个体——聚集体,在系统中像一个单独的个体那样行动。由此可见,聚集的作用不仅可以构建模型,而且更重要的是较为简单主体的聚集、黏着的

---

①约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧,韩晖,译.上海:上海科技教育出版社,2000:10-40.

相互作用,并由此涌现出复杂的大尺度行为。例如以蚂蚁为例,单个蚂蚁的行为墨守成规,环境一变它就死路一条。但是,大量蚂蚁聚集形成蚁巢后,其适应性就完全不同,它们可以在各种恶劣环境下生存。蚁巢所呈现出的许多壮观的涌现现象,非常像由大量相互连接的神经元所表现出来的智能,或者如各种抗体组成的免疫系统所具有的奇妙特性,以及无数细胞类型组成的生物体具有的惊人协调性,还有大城市的协调性和持存性。

事实上,聚集是所有 CAS 的一个基本特征,由此产生的涌现现象正是 CAS 最为令人关注的。CAS 理论需要研究识别出能使简单主体形成具有高度适应性的聚集体的机制,研究什么样的"边界"把这些适应聚集体区分开来;研究主体相互作用在这些边界内如何被引导和协调,这些相互作用产生的行为如何超越单个主体的行为等问题。①

在复杂系统的演变过程中,较小的、较低层次的个体通过某种特定的方式结合起来,形成较大的、较高层次的个体,这是一个十分重要的关键步骤。这往往是宏观性态发生变化的转折点。然而,对于这个步骤,以往的、基于还原论的思想方法是很难加以说明和理解的。

事实上,聚集现象在许多系统中都存在。例如,在生物界中,共生现象越来越多地得到重视和研究。近年来,人们发现,在一些高等生物体内存在着许多独立的低等生物。这些低等生物完全是独立的个体,按照自身的规律生存和发展。它把高等生物体内的条件作为自己的生存环境,进行着物质、能量与信息的流通与处理,如人体细胞中的线粒体。一方面,它们是完整意义下的、独立自主的生物;另一方面,在长期演化过程的作用下,它们必须也只能在人体内的这种环境中生存。如果按传统意义下的系统元素去理解,则这两方面的矛盾将是无法解决的。因为在传统思维框架中,部分或元素是"死的"、被动的、没有自己的目的与意志;如果有自己的目的、意志、主动性,那就只会对系统起瓦解作用。这就把

①郭士勇,等.非线性科学与复杂性科学[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006:187.

上述的两个方面绝对地、不可调和地对立起来、割裂开来。生物界的事实告诉我们,这种思维方式是不符合客观实际的。托马斯(L. Thomas)用许多生动的共生体的事例说明了这方面的情况。如果我们把目光转向社会生活,那么这种例证又可以增加许多。个人与社会,雇员与企业,以及企业集团的形成等,都反映了不同层次的主体之间的有效的协同和共生。①

聚集这个概念正是归纳和反映了复杂系统在这方面的行为特征。由于承认了个体的主动作用,由于克服了在整体与局部之间非此即彼的绝对的对立,CAS 理论提供了理解与描述上述现象的新视角。聚集不是简单的合并,也不是消灭个体的吞并,而是新的类别的、更高层次上的个体的出现;原来的个体不仅没有消失,而是在新的更适宜自己生存的环境中得到了发展。②这就是后面将要讲到的"粘着"的意义。

我国科学家钱学森也特别重视聚集在系统科学特别是复杂性当中的运用,他由此提出了综合集成的概念和综合集成方法,霍兰这里的聚集,其含义与钱学森的集成含义有着异曲同工之妙。

2. 非线性

近代科学所以在许多方面遇到了困难,重要原因之一就是它把自己的眼界局限于线性关系的狭窄范围内,从而无法描述和理解丰富多彩的变化和发展。非线性(nonlinearity)是指个体以及它们的属性在发生变化时,不完全遵从简单的线性关系。特别是在和系统或环境的反复交互作用中,这一点更为明显。

CAS 理论认为个体之间相互影响不是简单的、被动的、单向的因果关系,而是主动的"适应"关系。以往的"历史"会留下痕迹,以往的"经验"会影响将来的行为。在这种情况下,线性的、简单的、直线式的因果链已经不复存在,实际的情况往往是各种反馈作用(包括负反馈和正反馈)交互影响的、互相缠绕的复杂关系。正因

①②陈禹. 复杂适应系统理论及其应用[A]//许国志. 系统科学. 上海:上海科技教育出版社, 2000:254.

为这样，复杂系统的行为才会如此难以预测；也正因如此，复杂系统才会经历曲折的进化过程，呈现出丰富多彩的性质和状态。①

CAS 理论把非线性的产生归之于内因，归之于个体的主动性和适应能力。这就进一步把非线性理解为系统行为的必然的、内在的要素，从而大大丰富和加深了对于非线性的理解。因此，霍兰在提出具有适应性的主体这一概念时，特别强调其行为的非线性特征，并认为这是复杂性产生的内在根源。②

总之，CAS 的复杂性是由非线性因素引起的，线性是主体间各种正负反馈形成的环路，交差、缠绕形成的复杂网络，这些非线性都会产生复杂性。

3. 流

在 CAS 理论中，所谓流（flow）是指主体之间所构成的复杂网络节点间的物质、能量、信息等资源的流动。CAS 都是非平衡系统，其中存在各种物质、能量、信息的流动。如果把主体看成节点，把相互作用看成连接的边，则 CAS 可以表述成网络，再把其中流动的物质、能量、信息统称为资源，则一个 CAS 就是一个由｛节点、边、资源｝构成的三元组。③ 在 CAS 中，这些流的渠道是否通畅，周转迅速到什么程度，都直接影响系统的演化过程。例如，中枢神经系统由神经元连接，脉冲构成；因特网系统由网站、电缆和信息构成，生态系统由物种、食物链、生化作用等构成。

CAS 的三元组的存续运行要靠资源分配来实现，关键限定主要连接的相互作用，用标识来定义网络。因为系统适应过程应挑选有益于相互作用的标识，使带有这种标识的主体扩大，排除造成不良后果的标识，淘汰带有不良后果标识的主体。CAS 在此过程中表现出两种重要特性：一是乘数效应，能够放大有益的标识；二是网络中的再循环效应，利于保护资源，提高资源利用率。这两者

①陈禹，等. 系统科学与方法概论[M]. 北京：中国人民大学出版社，2006：105.

②陈禹. 复杂适应系统理论及其应用[A]//许国志. 系统科学. 上海：上海科技教育出版社，2000：255.

③苗东升. 系统科学精要[M]. 2 版. 北京：中国人民大学出版社，2006：213.

都是霍兰从经济学中借用而来,用于提高 CAS 的适应能力。

越复杂的系统,其中的各种交换(物质,能量,信息)就越频繁,各种流也就越错综复杂。所以,CAS 的理论把对于各种流的分析,当作一个值得注意的重要问题。

4. 多样性

所谓多样性(diversity)是指构成 CAS 的主体成分应该多种多样,彼此之间有一定的差异,彼此处于不同的生态位中,并形成一个协调、适应的功能整体。在适应过程中,由于种种原因,个体之间的差别会发展与扩大,最终形成分化,这是 CAS 的一个显著特点。例如,在热带雨林中,昆虫多种多样,树木也种类繁多,哺乳动物的大脑由大量的神经元组成,并形成一个完美的细胞核及区域的多级层次;在各个城市中,也有各式各样的批发商、零售商以及千千万万的消费者。

CAS 理论认为,无论是生物体、神经元还是公司,任何单个主体的持存都依赖于其他主体提供的环境。每种主体都在由以该主体为中心的相互作用所限定的合适生态位上。当从系统中移走一种主体,会产生一个“空位”,系统就会经过一系列的适应反应产生一个新的主体来补充“空位”。新的主体会占据被移走主体的相同生态位,并提供大部分失去的相互作用。当主体的蔓延开辟了新生态位,产生了可以被其他主体通过调整加以利用的新的相互作用的机会时,多样性也就产生了。

CAS 理论认为,多样性既非偶然也非随机。CAS 的多样性产生的原因在于适应过程是一种动态模式,通常具有持存性和协调性。在 CAS 中,由于部分主体灭绝而引起的相互作用模式的变动,常常会按以前的主导方式重塑自己。CAS 中的多样性是不断适应的结果,每一次新的适应,都为进一步的相互作用和新的生态位提供了可能性。

CAS 的多样性的形成与“流”有着密切关系。由前面研究流的再循环可知,参与循环流的主体使得系统能够保留资源并可被进一步利用,即它们将提供新的生态位以便被新的主体所使用。自

然界“优胜劣汰”的自然选择过程，就是通过增加再循环，从而增加多样性的过程。

考虑到非线性因素，CAS 中由形形色色主体的聚集行为所引发的资源再循环，比个体行为的总和要多得多。因此，用聚集的能力去促进单个主体的演化是困难的，采用分布式系统就容易获得这种复杂能力。

多样性的概念目前已经在许多领域中得到了广泛的使用，应该说，这是一个很大的进步。长期以来，人们误以为世界的统一性就意味着单一性。经过了 20 世纪科学的多方探索，今天我们已经开始承认和认真地面对多样性了，生物的多样性已经成为国际论坛上的热门话题，已经以国际公约的形式表达了人们的共识。文化的多样性也已经得到了越来越多的认同。系统复杂性的重要思想之一就是个体之间的差别，个体类型的多样性。当前的复杂性研究着眼于个体类型多种多样的情况，而其中的 CAS 理论则进一步研究这种多样性是怎样产生的，即分化的过程。霍兰指出，正是相互和不断适应的过程，造成了个体向不同的方面发展变化，从而形成了个体类型的多样性。而从整个系统来看，这事实上是一种分工。如果和前面的聚集结合起来看，这就是系统从宏观尺度上看到的“结构”的“涌现”，即所谓“自组织现象”的出现。

（三）机制描述

霍兰在四个通用特性的基础上，提出了 CAS 的三个运作机制，即标识机制、内部模型机制和积木机制。

1. 标识

在日常生活中，标识（tagging）对我们认识和把握对象具有特别重要的意义。如今社会上有许多人靠从事设计和制作标识作为职业，许多单位特别是公司、企业，设计、使用专门的商标、徽标，并美其名曰公司形象设计。军队的军旗，政治团体的旗帜如党旗、国旗、会旗等，也是为了方便大众辨识。在互联网上，信息的标题会使公告板或会议组的成员连接起来。霍兰认识到标识在对象辨

识、研究中的作用,于是把这个日常用语引进 CAS 理论中。他说:"在 CAS 中,标识是为了聚集和边界生成而普遍存在的一种机制"。① 在 CAS 的聚集过程中,引导众多主体辨识方向、选择目标、确定合作者和竞争者等,都需要一个贯彻过程始终的机制,即标识。标识是主体聚集的一面旗帜,或一个行动纲领。有了标识,也就打破了对称性,标识使我们能够观察和领略到以前隐藏在对称背后的特性。

标识能够促进选择性相互作用,因此它是 CAS 中普遍存在的特性。它允许主体在一些不易分辨的主体或目标中去进行选择。设置良好的、基于标识的相互作用,为筛选、特化和合作提供了合理的基础。这就使元主体和组织结构得以涌现,即使在其各部分不断变化时它们仍然能维持。"总之,标识是隐藏在 CAS 中具有共性的层次组织机构背后的机制。"②

为了相互识别和选择,个体的标识在个体与环境的相互作用中是非常重要的,因而无论在建模还是实际系统中,标识的功能与效率是必须认真考虑的因素,标识的作用主要在于实现信息的交流。流的概念包括物质流和信息流,起关键作用的是信息流。在以往的系统研究中,信息和信息交流的作用没有得到足够的重视。这是对于复杂系统行为的研究难以深入的原因之一。CAS 理论在这方面的发展就在于把信息的交流和处理作为影响系统进化过程的重要因素加以考虑。

2. 内部模型

自然界中的许多生物都具有预见性,如鸟儿们会学习去避免某些事,以虫为食的鸟能预感到某些特殊褐色的蝴蝶有苦味道。在 CAS 中,主体能够预知某些事情,是因为它本身存在一种极为复杂的机制——内部模型(internal models)。

---

①约翰·H. 霍兰. 隐秩序——适应性造就复杂性[M]. 周晓牧,韩晖,译. 上海:上海科技教育出版社,2000:13.

②约翰·H. 霍兰. 隐秩序——适应性造就复杂性[M]. 周晓牧,韩晖,译. 上海:上海科技教育出版社,2000:15.

主体的内部模型是主体在适应过程中逐步建立起来的。主体在接受外部刺激,做出适应性反应的过程中能合理调整自身内部的结构。最终,结构的变化,即内部模型,必须使主体能够预知再遇到该模式或类似情形时,将发生什么后果。因此,主体复杂的内部模型是主体适应性的内部机制的精髓。

通常将内部模型分成隐式和显式两类。隐式内部模型在对一些期望的未来状态的隐式预测下,仅指明一种当前的行为。例如,一个细菌向某种化学梯度变化的方向运动,隐约地预测出食物所在的方向。免疫系统产生的作用和特征属于隐式模型。而显式模型用于作为其他选择时进行明显的内部探索,即前瞻过程。例如,在下象棋时移一个棋子前,对所有着法可能产生的后果要在头脑中进行充分的思考。经济系统中主体的内部模型既是隐式的,也是显式的。

如何把内部模型与其他与建模无关的诸内部结构区分开来?如果仅考察一个主体的内部结构,就能推断出该主体的环境,那么这个主体的内部结构就是一个内部模型。如果主体产生的行为对未来的结果能够有效地预知,则主体具有一个有效的内部模型;反之,则具有无效的内部模型。通过进化过程,可以把未来的结果和目前的行为联系起来,从而可以支持有效的内部模型并剔除无效的内部模型。

虽然细菌的隐式模型和哺乳动物的显式模型有着明显的差异,但是在这两种情况下模型承担的预知任务,都增强了生物体的生存机会,在这一点上有着它们的共性。显然,模型的变异受选择的进化适应过程所支配。

3. 积木

人们往往把一个复杂事物分解成若干个部分来处理。同样复杂系统常常是由一些相对简单构件(积木块)的不同组合而形成的。因此,复杂性程度不仅在于构件的多少与大小,而且更在于原有积木的重新组合方式。图 3.2 给出七种积木块多种拷贝的组合。

在 CAS 中,所谓积木(building blocks,亦译构件)就是构建 CAS

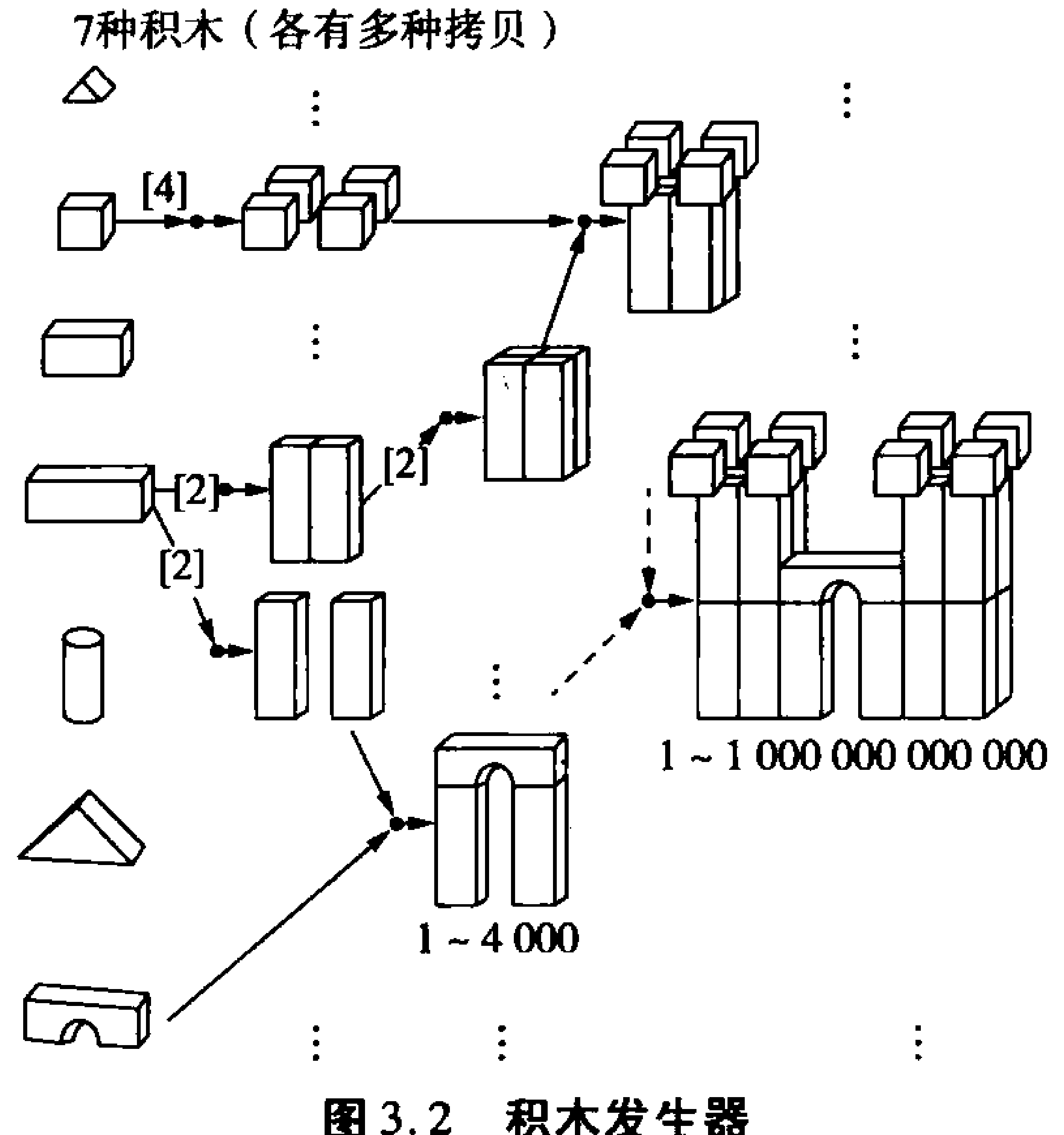


图 3.2 积木发生器

的基本模块或模式，以及搭建的组合规则。复杂系统常常是在一些相对简单的构件基础上，通过改变它们的组合方式而形成的。因此，事实上的复杂性往往不在于构件的多少和大小，而在于原有积木的重新组合。基于规则的主体不可能事先准备好一个规则，使它能够适应所遇到的每一种情况。因此，主体通过组合已检验的规则来描述新的情况，那些用于可供组合的活动规则就成为积木。

当我们把某个层次的积木块还原为下一层次积木块的相互作用和组合时，就会发现其内部的规律。因此，积木机制是人们认识复杂世界规律的工具。使用积木生成内部模型，是复杂适应系统的一个普遍特征。当模型是隐式时，则发现组合积木的过程通常是按进化的时间尺度来进展；当模型是显式时，则时间的数量级就要短得多。人们能把音符转换成无数美妙的音乐，有限范围的形态学可以描述出大量的动物结构的谱系。我们日常遇到的也有很多这种情况。如果我们遇上“一辆行驶的红色萨博（SAAB）汽车在高速路上车胎漏了气”这一情况，我们会立即用一系列可能的办法来处理，即使我们以前从未遇见过这个情况。我们不可能为一切

可能发生的情况准备一系列规则。同样的原因，免疫系统也不可能保存所有可能的入侵者的名单。因此，我们把情况分解开，从我们日常积木的全部技能中，唤醒有关“高速路”“汽车”“轮胎”等的规则。迄今为止，这些积木都曾经被实践过，并在千百次的重复中被改善。当遇到一种新情况时，我们会采取适当的行动，将相关的、经过检验的积木组合起来，应付新的情况，采取适当行动，取得满意结果。

霍兰提出了内部模型和积木机制的作用在于强调层次的概念。当我们超越层次的时候，就会有新的规律与特征出现。把下一层次的内容和规律作为内部模型以一个整体参与上一层次的相互作用，着重研究这个积木和其他积木间的相互作用和相互影响，在上一层次中，这种相互作用和相互影响是起决定性的主导因素。

内部模型和积木的作用在于加强层次的概念。客观世界的多样性不仅表现在同一层次中个体类型的多种多样，还表现在层次之间的差别和多样性。当我们跨越层次的时候，就会有新的规律与特征出现。这样一来，我们需要深入考虑的就是这样一些问题：怎样合理地区分层次，不同层次的规律之间怎样相互联系和相互转化。内部模型和积木的概念就是用来回答这些问题的。概括地说，它们提供了这样一条思路，把下一层次的内容和规律，作为内部模型“封装”起来，作为一个整体参与上一层次的相互作用，暂时“忽略”或“搁置”其内部细节，而把注意力集中于这个积木和其他积木之间的相互作用和相互影响上，因为在上一层次中，这种相互作用和相互影响是关键性的、起决定性作用的主导因素。了解计算机科学技术的读者不难看出，这种思想与计算机领域中的模块化技术以及近年来广为传播的“面向对象的方法”是完全一致的。

霍兰用了大量例子解释四个通用特征和三个运作机制在各种领域中的用途，并用树的形象来表述了七个工具之间的关系、所处地位及其发挥的作用（图 3.3）。[1]通过这七个 CAS 刻画工具的表

①约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧，韩晖，译.上海：上海科技教育出版社，2000：39.

述，主体的特点就充分表现出来了：它是多层次的、和外界不断交互作用的、不断发展和演化的、活生生的个体。有了这些刻画工具，我们就能描述个体的适应性和组织的维生机制了。

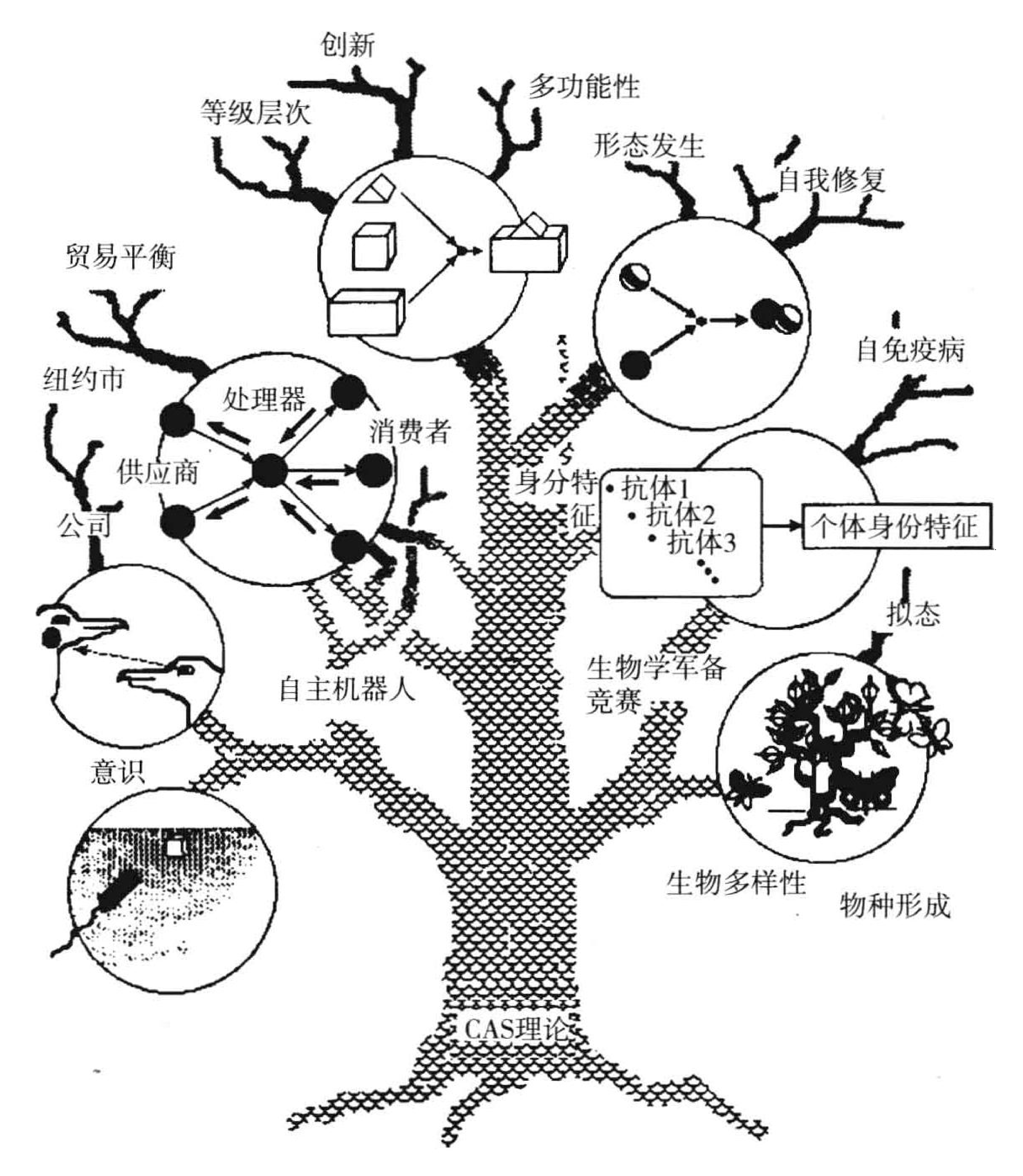


图 3.3 复杂适应系统的树形刻画

二、主体的适应性刻画

理清了适应性、主体等核心概念，并打造了七种 CAS 的描绘工具之后，霍兰就重点刻画单个主体是如何适应和学习的，为适应性主体提供一个适用于所有在 CAS 中出现的不同种类主体的定义和机制。按照这个想法建立的框架由三大部分组成：①执行系统，

②信用分派算法，③规则发现算法。为了实现上述三个目标，霍兰通过以下三个步骤建立了他所定义的具有主动性的主体的基本模型[①]：

第一步：建立行为系统的模型（Performance system）

第二步：确立信用分赋值的机制（Credit assignment）

第三步：提供规则发现的手段（Rule discovery）

模型的目标是要用一种统一的方式来表达各种系统中的主体。行为系统是个体的构架，称为刺激-反应模型。它包括二进制的探测器和反应器，分别用来接受输入和产生输出；但是它的核心在于规则的产生和调整，在上述第②条和第③条中反映出来。

（一）执行系统——刺激-响应模型

适应性主体的执行系统刻画了主体在某个固定时点上的能力，即在尚不知道进一步如何适应的情况下能够做什么。

使用规则可以对适应性主体加以描述，其实执行系统本来就是基于规则来描述主体行为的最基本的模式。最简单的一类规则为 IF（条件为真）THEN（执行动作），即刺激-响应模式。

执行系统的三个基本元素是：一组探测器，一组 IF/THEN 规则和一组效应器。探测器表征主体从环境中抽取信息的能力，IF/THEN规则表征处理那些信息的能力，而效应器则表征它作用于环境的能力（图 3.4）。[②]这三个元素都是抽象的，剔除了机制的细节，可应用于不同种类的主体。

仔细考察探测器的概念，我们就会更好地理解何所失、何所得。抗体使用的探测器依赖于化学键的局部排列，而生物体的探测器可以用它们的感官很好地加以描述，商业公司的探测器通常用它各种部门的职责来描述。在每种例子中，都有些关于从环境

---

①约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧，韩晖，译.上海：上海科技教育出版社，2000：42.

②约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧，韩晖，译.上海：上海科技教育出版社，2000：44.

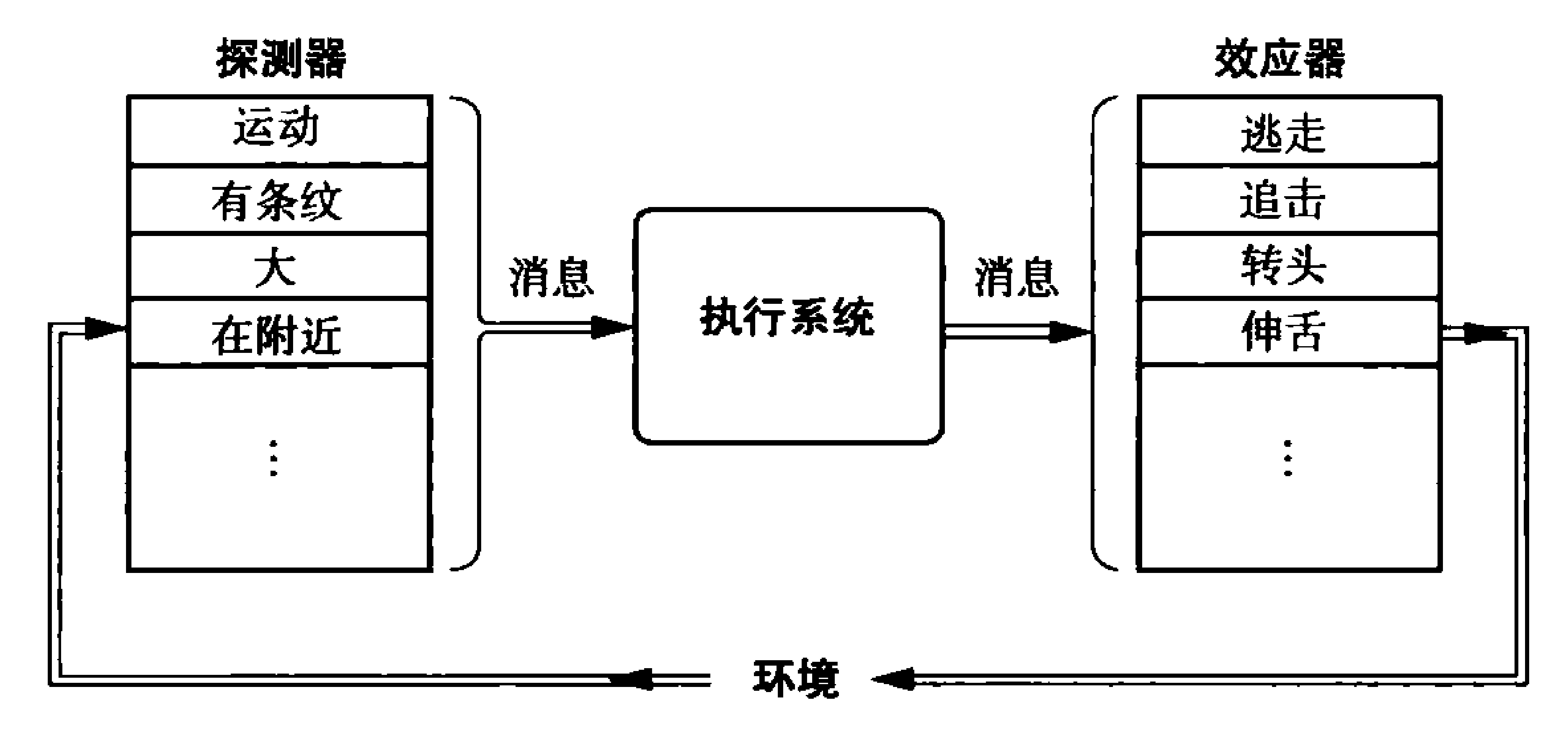


图 3.4 刺激-响应模型

中抽取信息的特殊机制的有趣问题,但在此我们将这些问题放在一边。我们的框架集中于所产生的信息——主体对之敏感的环境特性上。我们利用了这样一个事实:任何这种信息皆可用二进制串表示,此处叫做消息。我们获得了用统一方式描述主体抽取环境信息的能力。在用对消息敏感的效应器去定义执行系统影响环境的能力时,我们同样有失有得。

对主体在内部处理信息的能力,我们有着同样的考虑。机制是各种各样的,但我们把注意力集中于信息处理上。把 IF/THEN 规则与消息结合起来,我们得到了这种形式的规则:IF(在消息录上有适当的消息)THEN(发出指定的消息)(图 3.5)。[①]这样做,我们丧失了特殊主体处理信息所使用的机制的细节。例如,如果我们研究胚胎发育中基因开启和关闭的过程,我们丧失了所有吸引人的关于阻抑(repression)和去阻抑(derepression)的特殊机制的细节。但我们保留了对于事情发展阶段的描述,以及在每个阶段反馈的信息。总的来说,我们获得了这样一种能力,它可以描述任何在计算机上建立的模型进行信息处理的能力。由于许多规则同时起作用,我们获得了描述复杂适应系统分布式活动的一种自然方式。特别是,具有并行性的系统可以用熟悉的元素自动描述新的情况;以缺省层次的方式存在的内部模型是自然形成的。在 CAS

①约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧,韩晖,译.上海:上海科技教育出版社,2000:47.

中，这两种活动都是普遍存在的。一旦我们选定基于规则的执行描述，那么适应过程就继续提供了框架的②和③部分。

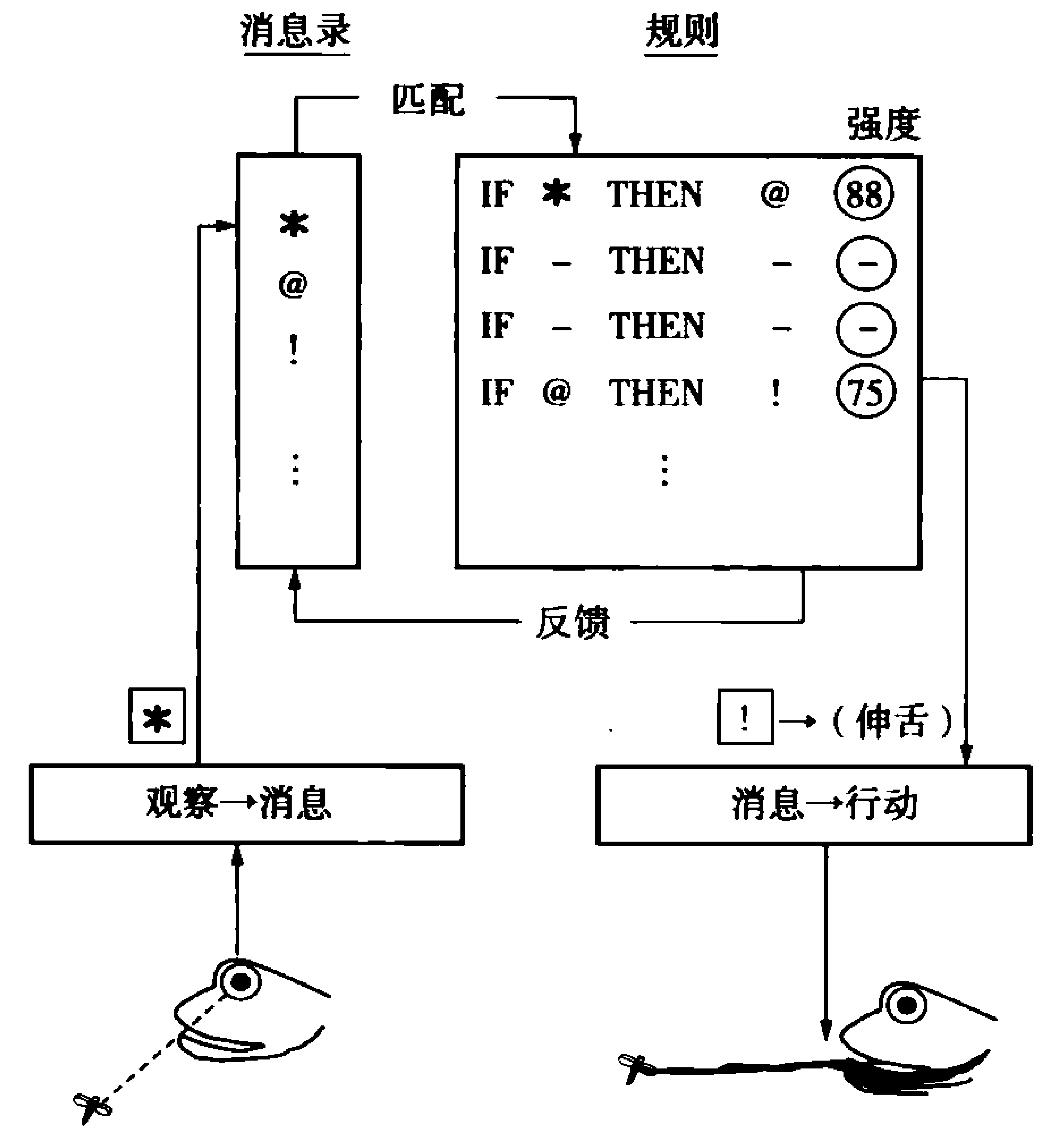


图 3.5　消息传递执行系统

应该说明的是，这里的因果规则（或按遗传算法称为染色体）应当足够多而且有选择的余地，它们之间不但可以，而且需要有矛盾和不一致。一般的“IF…THEN…”认为，所有的规则都应当互相一致，既不重复（每一个刺激只有一种确定的反应）也不遗漏（每一个刺激必然有唯一的一条规则与之相对应），否则就是有矛盾，系统就被认为是处于错误的状态。其实这些规则只是有待于测试和认证的假设。进化的过程正是优胜劣汰各种候选规则的过程。信用分赋值的任务便是在这些规则之间进行比较和选择，进而进行淘汰的机制。

（二）确立信用分赋值机制

为了对规则进行比较和选择，首先要把假设的信用程度定量化，为此我们给每一条规则一个特定的数值，称为强度（Strength），

或者按照遗传算法的名称，称之为适应度（Fitness）。每次需要使用规则的时候，系统按照一定的概率选择，具有较大强度或适应度的规则有更多的机会被选用。在这个基本算法的基础上，还可以加入并行算法和缺省层次等思想，使得规则的选择更加灵活，更加符合现实的系统行为。①

信用分赋值的本质是向系统提供评价和比较规则的机制。当每次应用规则之后，个体将根据应用的结果修改强度或适应度。这实际上就是“学习”或“经验积累”。

信用分赋值有两种情况：①当系统因某个行为产生直接的赢利（奖赏、增援）时，给这个行为打分相对比较容易。②当行为系统同时有很多规则起作用时，或者现在行为的结果显现出来前要经过很长一段时间，信用分赋值就变得尤为复杂。它非常像象棋里的开局让棋法。在不能一目了然的情况下，一个主体如何确定哪些规则有帮助作用、哪些规则有阻碍作用呢？CAS 理论借用经济生活中的竞争和资本间的一般联系，把每个规则看成是买卖消息的生产商（代理商、经纪人）。规则的“供应商”是那些满足条件发送消息的，规则的“消费者”是那些作用于消息的。规则的实力看作是手头的现金；也就是说，它的实力由现金而定。当一个规则卖了消息，它的实力就会由买者所付的钱数增加。

通过拍卖出价的过程引入竞争。只有条件满足的规则才有资格出价，且只有胜者有权利发出（“卖出”）消息。一个规则出价的多少由其实力而定。实力强的出价高。然后，胜者付钱给供应商；输者什么也不付。

赢了之后，胜者实力减弱，供应商实力增强。但是，胜者已经有权利发送消息，或许它们也会有消费者出价并付钱。在这种情况下，只有当消费者付的钱比第一次的出价多，赢的规则才会发展壮大。老资本家都信守这条格言：便宜买入，高价卖出！具体过程被称为传递队列（bucket brigade）算法，它会加强那些旨在最终获得好处的系列行为的规则。处理过程是循序渐进地对布局和子目

①陈禹，钟佳桂．系统科学与方法概论[M]．北京：中国人民大学出版社，2000：111．

标假设进行确认。对于在统计意义上规范的环境来说，数理经济学的定理能够证明这个结果，并且，计算机模拟也表明，它在多种环境里都行得通，特别是与规则的发现过程组合起来的时候。

（三）新规则的发现或产生

规则发现，近似合理假设的生成，集中于经过检验的积木的使用上。过去的经验会直接体现出来，而创新有着广阔的空间。这种重新组合积木的特定方法在遗传学上用得很多，但任何一个具有普遍性的过程都可以用这种方法抽象出来。利用积木，我们甚至可以描述思想的神经生理学理论。

经过与环境的对话与交流，已有的规则就能够得到不同的信用指数。在这个基础上，下一步的要点就是如何发现或形成新的规则，从而提高个体适应环境的能力。

这里的基本思想是，在经过测试后比较成功的规则的基础上，通过交叉组合（crossover）、突变（mutation）（图 3.6）等手段创造出新的规则来。[①]需要注意的是，由于在这里是基于经验来进行新规则的创造，所以比纯粹根据概率去查找和测试一切可能性要快得多，效率也高得多。

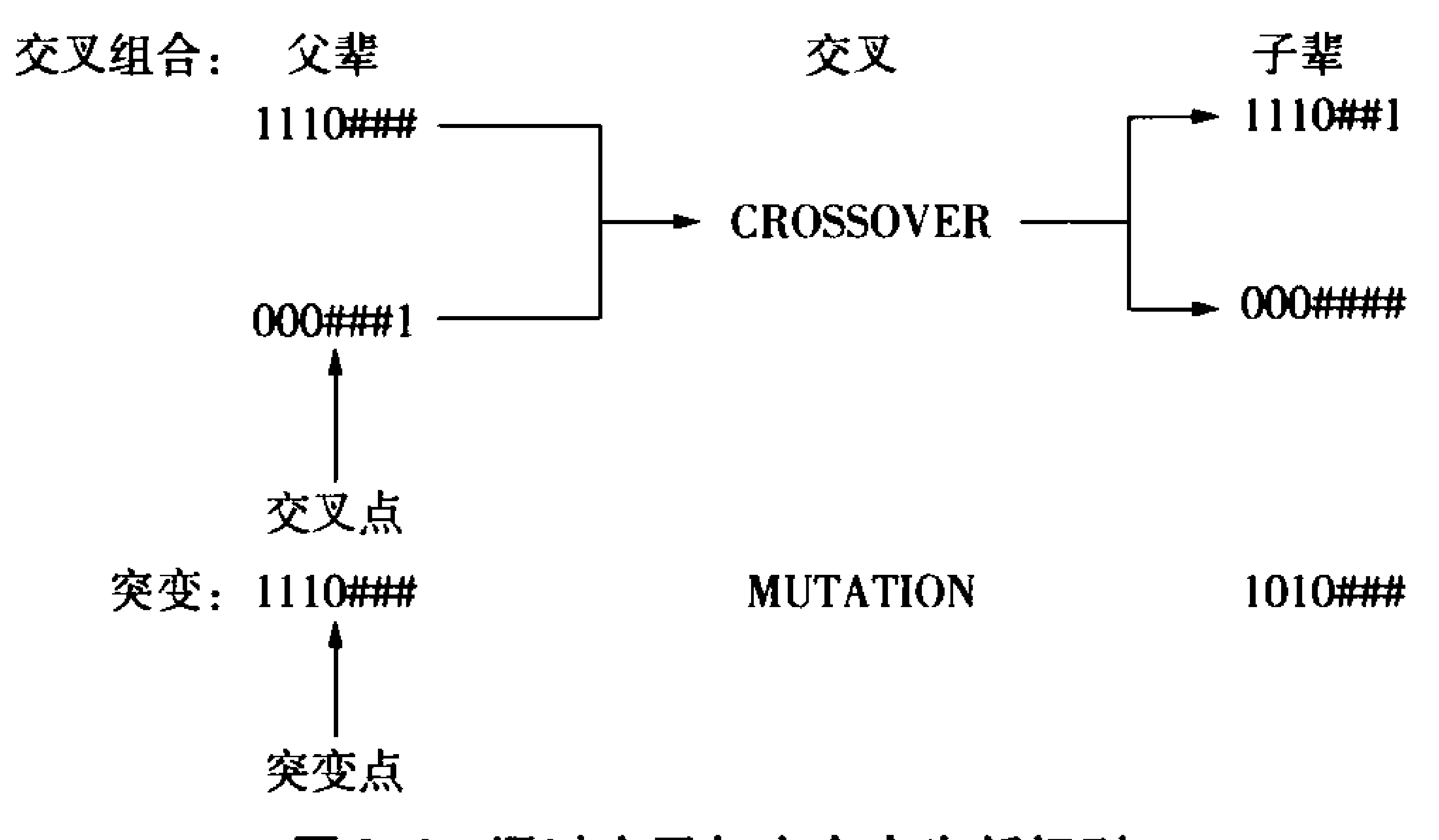


图 3.6 通过交叉与突变产生新规则

规则发现，合理假设的生成，集中在经过测试的积木块的使用

①陈禹，钟佳桂. 系统科学与方法概论[M]. 北京：中国人民大学出版社，2000：112.

上。过去的经验会直接体现出来,同时创新有着广阔的空间。这种积木块重新组合的特殊方法在遗传学上用得很多,但任何一个具有普遍性的过程都可以用这种方法抽象出来。用积木块的思想,我们甚至可以描述神经生理学的理论。

我们现在不妨看一看赫布(Hebb)1949年发表的、但至今仍很有影响的论文。在赫布理论中,细胞集合(cell assembly)就是几千个相互关联的能够自动保持回应(self-sustained reverberation)的神经元集合。细胞集合的运行有点像通过标识耦合在一起的一小簇规则。多个细胞集合的行为之间是并行的,通过大量的突触神经元之间的接触(一个神经元可能会有上万个突触)广泛地传播消息(脉冲)。细胞集合通过招募(吸收其他细胞集合加入)和分化(分成作为后代的片段)竞争神经元。我们很容易把这个过程看成是经过检验的积木重组。此外,多个细胞集合可以集成为叫做相序列(phase sequences)的较大结构。事实上,重新阅读赫布的论文,不难发现处处都有与我们讨论的所有过程对应的东西。

鉴于标识在规则耦合和提供后续活动方面起着如此重要的作用,故重要的是注意它们也拥有积木。标识实际上就是出现在规则的条件和动作部分的模式。这样的话,它们的操作就与规则的其他部分一样了。已确立的标识——那些见于强规则中的标识——会育出相关的标识,提供新的耦合、新的集合和新的相互作用。标识总是试图通过向缺省层次提供的骨架加入血肉(关联),来丰富内部模型。

三、多主体的适应与维生

通过刺激-响应模型、信用赋值和规则发生等三步刻画的仅仅是单主体的适应性问题,任何实际的复杂适应系统都不可能仅由单主体构成,而是由许许多多的主体一起相互作用而共同构成。由诸多主体构成的复杂系统,其适应性又该如何刻画呢?

我们仍然分三步走,首先定义资源和位置(site),然后提出一个基本模型,在此基础上补充一些更复杂的属性,形成最终的多元的实际模型:回声模型。

(一)外部条件:资源和位置

任何组织的生存和维持都需要来自系统外的各种外在条件,这些外在条件虽然多样,但大致可归类为两种:资源和位置。

所谓资源,是组织适应维生的所需要的输入条件,是一个广义的资源概念。资源由一组字母[a,b,c,d,…]表示。例如,现实生活中的水井或泉水,它可以不断地向主体提供所需要的某种物质或能量。类似地,在经济系统中,银行就起着提供资金的作用。

另一个概念是位置(site),它是组织适应维生所需要的空间场所。它是一个可以容纳若干个体活动的"容器",具有一定的环境条件与资源条件,例如"温度"和"服务水平"等。个体可以在位置之间移动和选择。各个位置之间还有"距离"等概念。这就像一般计算机模拟中的环境参数一样。每个位置可能有一个泉源,在每个时间步提供一种资源选择,即使某些位置或大部分位置是荒芜之地。实际上,资源是可更新的。

资源和位置,作为输入组织内部的外在条件,为系统的适应维生提供了基本的硬件基础。

(二)基本模型

所谓的多主体模型其实就是一种多个相互作用的模型,霍兰把它取名为 ECHO 模型或回声模型。为了能相互作用,主体应该具有最简单的功能:寻找交换资源的其他主体,与其他主体进行资源交流,保存及加工资源。

为了具备上述功能,从结构上来说,主体应有三个基本部分:

(1)主动标识(offence flag)——用于主动地与其他主体联系和接触。

(2)被动标识(defense flag)——用于其他主体与自己联系时决定应答与否。

(3)资源库(reservoir)——用于存储的加工资源。这样,这个

主体的基本情况就如图 3.7 所示。①

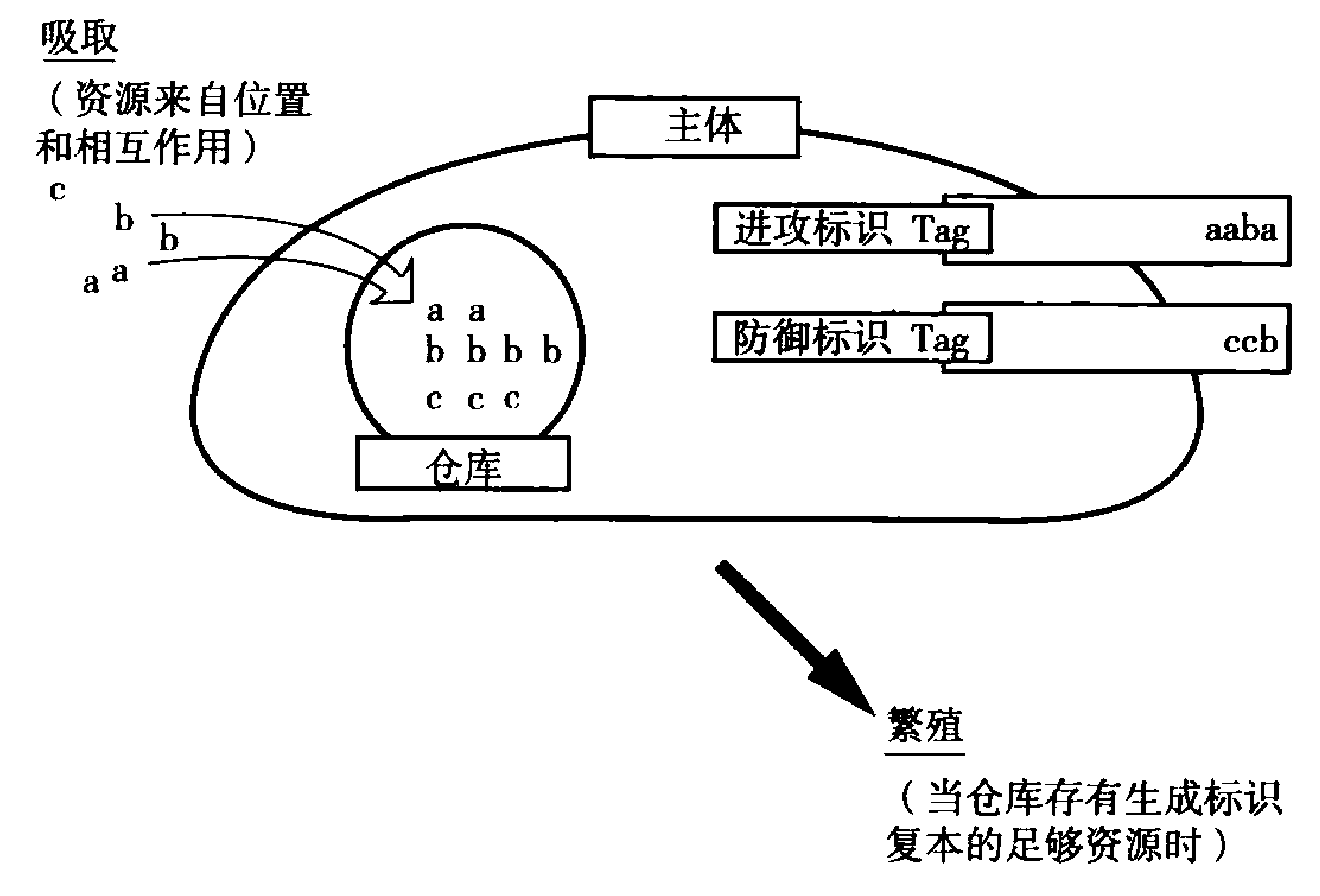


图 3.7　回声模型中的主体

基本回声模型的功能包括：主动与其他主体接触，同时也对其他主体的接触进行应答，如果匹配则进行资源交流，在自己内部存储与加工资源；如果资源足够，则繁殖新的主体。

在此基础上，整个 ECHO 模型成为这样：

- 整个系统包括若干个位点（site）；
- 每个位点中有若干个主体和资源泉；
- 主体之间进行交往，交流资源和信息。

在回声模型中，资源与位置是个体的生存空间。回声模型的"地理"是由一组互相连接的位置指定的。位置是一个可以容纳若干个体活动的"容器"，具有一定的环境条件与资源条件。每个位置有一个资源泉，它指定了该位置在每一个时间步的资源值。每个位置的资源值并不相同，可以是零或更多。一组可"更新"的资源则奠定了回声模型的基础。对这组资源的处理相当抽象：资源是用字母表示的。比如，用[a,b,c,d]代表四种资源，回声模型中的任何东西都是通过把这些资源组合成字符串构造的。

①约翰·H. 霍兰. 隐秩序——适应性造就复杂性[M]. 周晓牧，韩晖，译. 上海：上海科技教育出版社，2000：101.

回声模型中，主体由两部分组成：存放所收集资源的资源库(reservoir)，由资源字母组成；表示能力的"染色体"串，它只指定两个标志：进攻标志和防御标志。一个主体获取资源的能力与它的进攻标志和其他主体或位置的防御标志的匹配程度成正比。它防守资源的能力则与其防御标志和其他主体的进攻标志的不匹配程度成正比(图3.8)。①

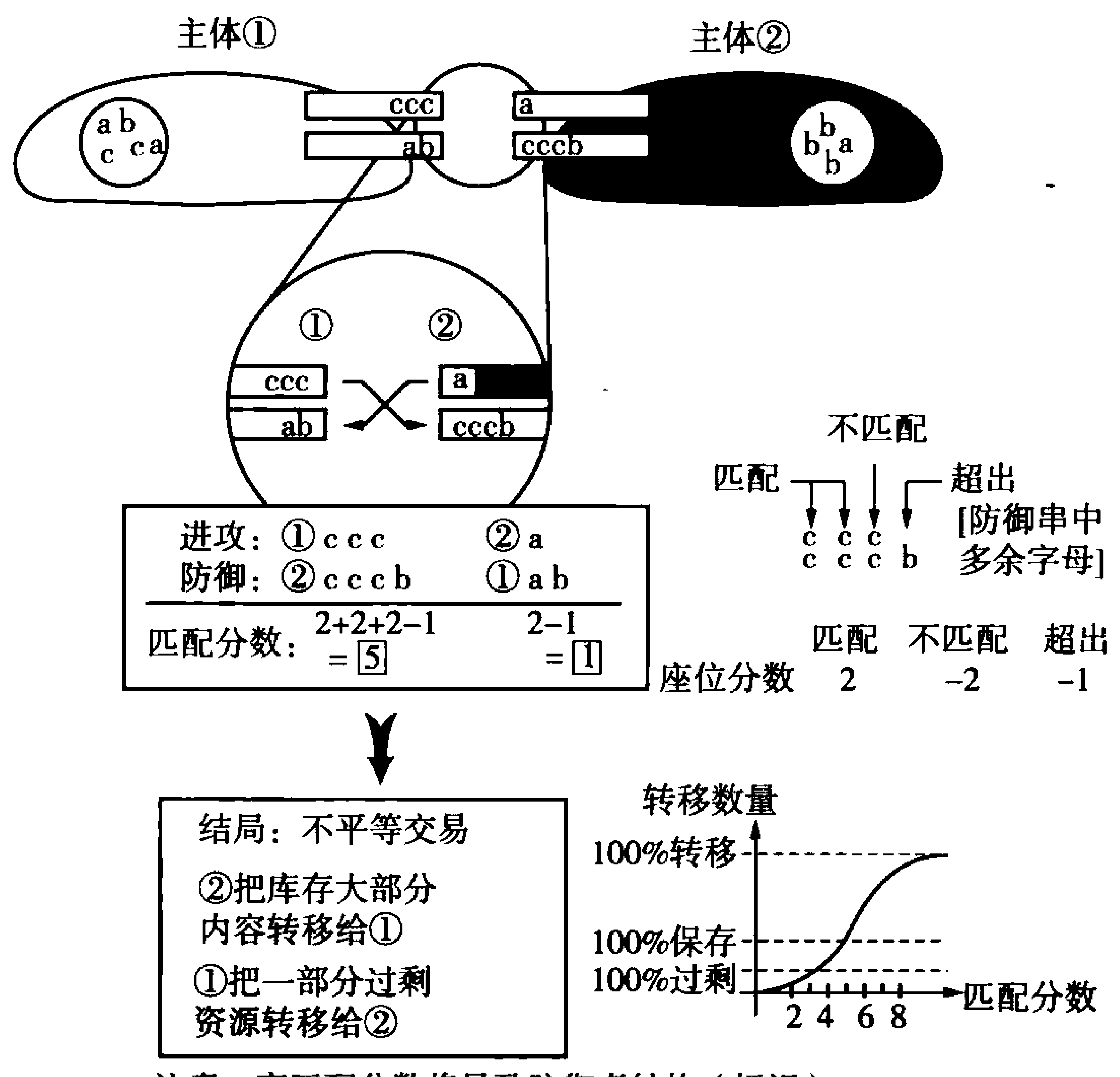


图3.8 资源交换

ECHO模型的关键在于规定了一个主体只有在收集了足够的资源能够复制其染色体串的时候才能繁殖。主体的适合度，即繁殖后代的能力，隐含在资源收集能力中。因此这个ECHO模型中主体的主要活动就是和其他主体进行资源交换活动。而模型中所

①约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧，韩晖，译.上海：上海科技教育出版社，2000：103.

有的相互作用都受上述两个标志的调节。

当两个主体在一个位置相遇，一个主体的进攻标志与另一个主体的防御标志进行匹配比较。如果一个主体的进攻标志和另一个主体的防御标志非常匹配，那么，它就能获取对方大部分资源，甚至可能获取对方染色体上的资源（从而杀死对方）。否则这个主体只能获得对方资源库中很少一部分资源，或者一无所获。当资源积累到足够的程度，就进行繁殖。

（三）扩展机制

基本回声模型虽然具有进攻、防御和交换功能，但仍然不能完全模拟实际多主体系统的交互作用过程，为此还必须添加一些新的相互作用机制才能用来模拟实际复杂系统主体之间的相互作用，并由相互作用而达到多主体之间的适应和复杂组织的维生持存。

为了能够完整模拟真实的相互作用过程，我们必须给主体添加如下五个作用机制①：

（1）增加“相互作用条件”机制，即在进攻标志与防御标志相符合的条件之外，还要加上相互作用条件。两个主体并不是只要相遇就可以进行交互作用，还要看是否符合相互作用条件。

（2）增加“资源转换”机制，即主体具备加工、利用和重组资源的能力。主体被赋予了把一种资源转换成另一种资源的能力，比如把多余的资源转换成繁殖需要的其他资源。增加这一功能为主体的分工和专门化奠定了基础。

（3）增加“黏着（adhesion）”机制。黏着提供了一种形成多主体聚合体的方法。主体之间选择性地相互黏着，甚至形成“层次”，最后它们作为一个整体移动和进行相互作用。聚合体中的单个主体通过代代相传，可以逐渐适应，并充分利用聚合体中其他主体提供的特定环境。聚合体中一个主体可以专职于进攻或防御，而另一个主体则专职于获取资源。如果这两种主体交换合适的资源，

①陈禹，钟佳桂. 系统科学与方法概论[M]. 北京：中国人民大学出版社，2000：115-116.

那么聚合体和主体都将会更有效地收集和保护资源,从而加快繁殖速度。可以说“黏着”为功能分化的形成提供了条件。黏着标志和边界都是用来限制主体间的相互作用的。

(4)增加“选择交配(Selectivemating)”机制,即主体可以有选择地与其他主体结合,通过交叉组合形成新的更强的主体。配偶的选择是需要一定条件的,比如①可以繁殖(有足够资源),②存在于给定主体的相互作用域之内。如果两个主体的选择性交配条件都得以满足,交配就继续进行。“父母”使用它们资源库中的资源,为染色体制作拷贝。这些染色体拷贝进行交叉繁殖,发生突变,最后在该位点增加后代。

(5)增加“条件复制”机制。从单细胞进化而来的多细胞动物中拥有各式各样的细胞类型,然而所有这些类型细胞的染色体都是一样的。CAS 理论认为这是因为染色体上的各个基因是可以“开”和“闭”的。不同的基因处于“开”的状态,就会产生不同的酶和不同的反应,从而形成不同的结构。同一染色体上不同基因的行为使多细胞动物在成长过程中表现出了组织扩展和多样性。因此,一个组织就会拥有不同的细胞如神经细胞、肌肉细胞和血细胞等,虽然这些细胞拥有同样的染色体。这种代代相传的复制产生了多样性。

经过对基本回声模型的扩展,即增加了上述五个作用机制之后,主体模型比较接近实际的相互作用模型,能够用来真正刻画多主体之间的相互作用、相互适应和维生持存等功能。能够模拟实际相互作用的真实主体,其结构由连成串的、表示资源的字母表示,这些串称为染色体。(这里的染色体在复杂性和功能方面,与生物染色体尽管有一些相似之处,但还是相差很远。)另外,每个主体都有一个仓库,存放通过与位置和该位置其他主体的交互作用而获取的资源。除此之外,主体没有其他部分。为了繁殖,主体必须通过交互活动收集足够的资源,以便复制其染色体。

真实主体的染色体包括两个部分:标识段和控制段。这一染色体为主体提供三个标识,三个交互作用条件,一种资源转换能力和一种控制主体处于活动或不活动状态的手段(图 3.9)。标识段

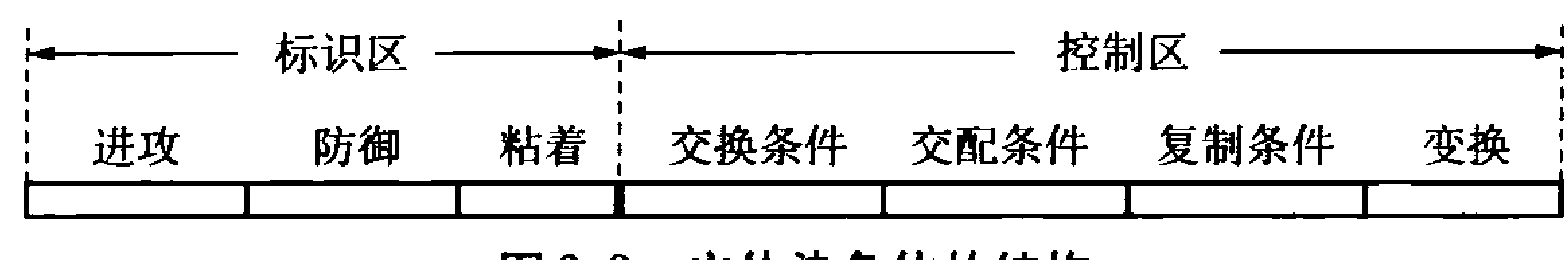


图 3.9 主体染色体的结构

包括三个标识:进攻标识、防御标识和粘着标识。两个主体交互作用的时候,一个主体的进攻标识与另一个主体的防御标识进行匹配比较,以决定两个主体之间交换的资源数量。进攻标识还用于限制条件交换、配偶选择和条件复制交互。粘着标识则来决定两个交互主体间的粘着程度。

(1)粘着标识有一些对回声模型中组织的形成和演化起着重要作用的附属装置。主体聚集时会形成一种叫做边界的外主体结构。一种树形结构能够记录边界以及每个分主体在聚集体中的相对位置。

(2)有时聚集体会形成一种特殊结构,叫做多主体。此种单元把各分主体的染色体看作单个染色体,它共享其库存的资源以复制整个多主体。在树结构中也会相应标记出代表多主体边界的结点。

控制段包括三种对象:条件、资源变换和活动标记。

(1)条件有三个:交换条件、交配条件和复制条件。每当两个主体配对交互作用时,每个条件都会检查对方染色体中的进攻标识以确定交互活动是否继续进行。

(2)资源变换的次数可以是任意值。每次都指定一个源资源和一个目标资源;如果库存中有相应的资源,就会通过资源变换,以固定的速率变换成目标资源。

(3)控制段中有一个标记。如果标记置为 1,多主体就会使用主体的标识调节其交互活动;否则多主体就会忽略主体的存在,好像这个主体并不存在于其聚集体中。

经过添加上述五个机制,适应性主体变成了具有强大交互功能的染色体,由此它能够完成多个主体之间的资源交换和其他相

互作用(如图3.10)。[1]通过主体染色体的各种机制,完成主体间的相互作用或交互活动,因此回声模型其实就是由多个主体构成的系统中,主体之间的交互作用和相互适应的科学模型,由主体间的相互作用和适应来造就系统组织的稳定性和维生性。

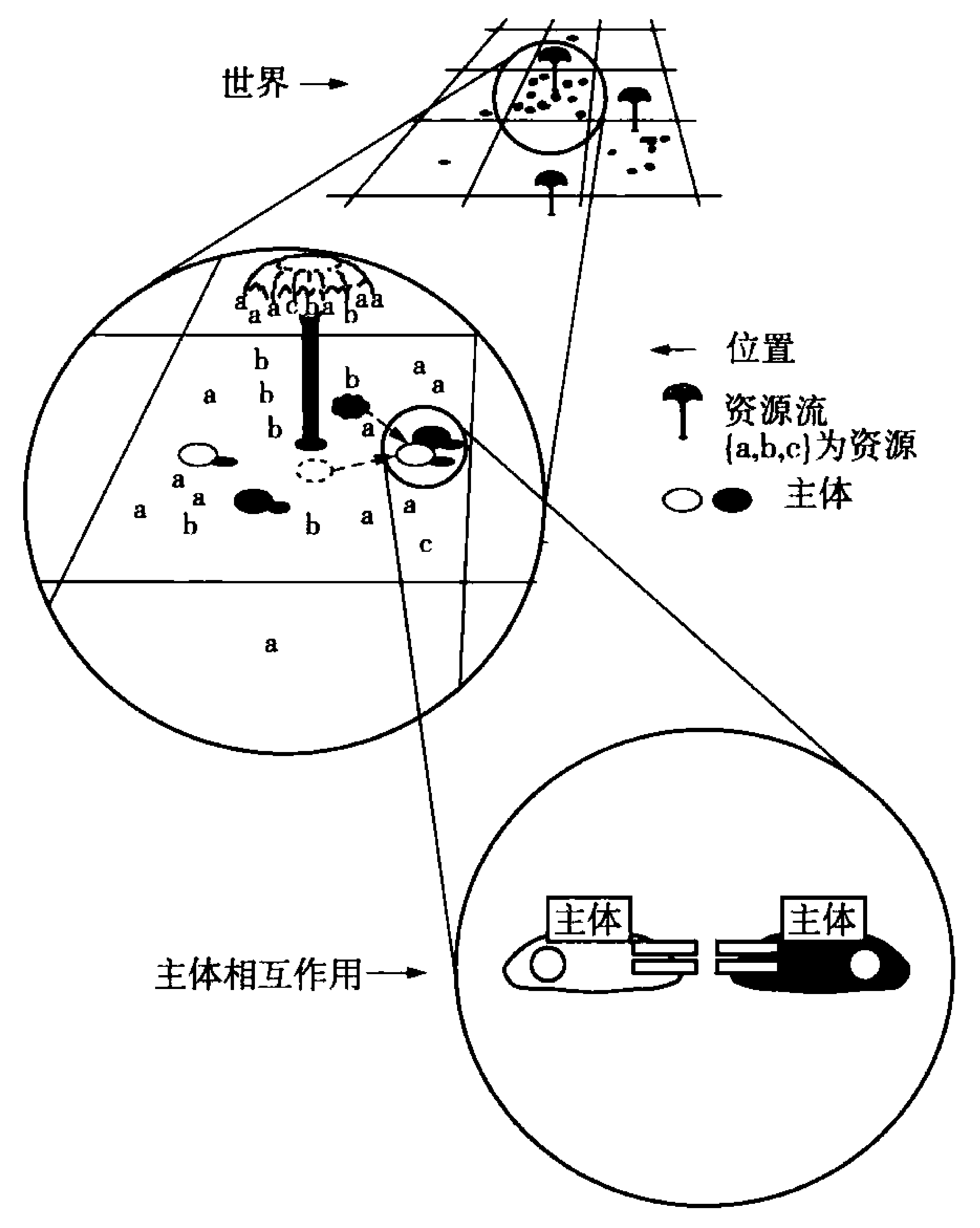


图3.10　回声模型总览

回声模型的核心是某些位置处主体之间的交互活动,这也就是模拟的中心程序。图3.11是一个计算机模拟的流程图。[2]它描述了若干单个自由主体怎样演化成多主体,又怎样从单个种子多主体变成有若干个多主体构成的特定聚集体。

①约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧,韩晖,译.上海:上海科技教育出版社,2000:100.

②约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧,韩晖,译.上海:上海科技教育出版社,2000:143.

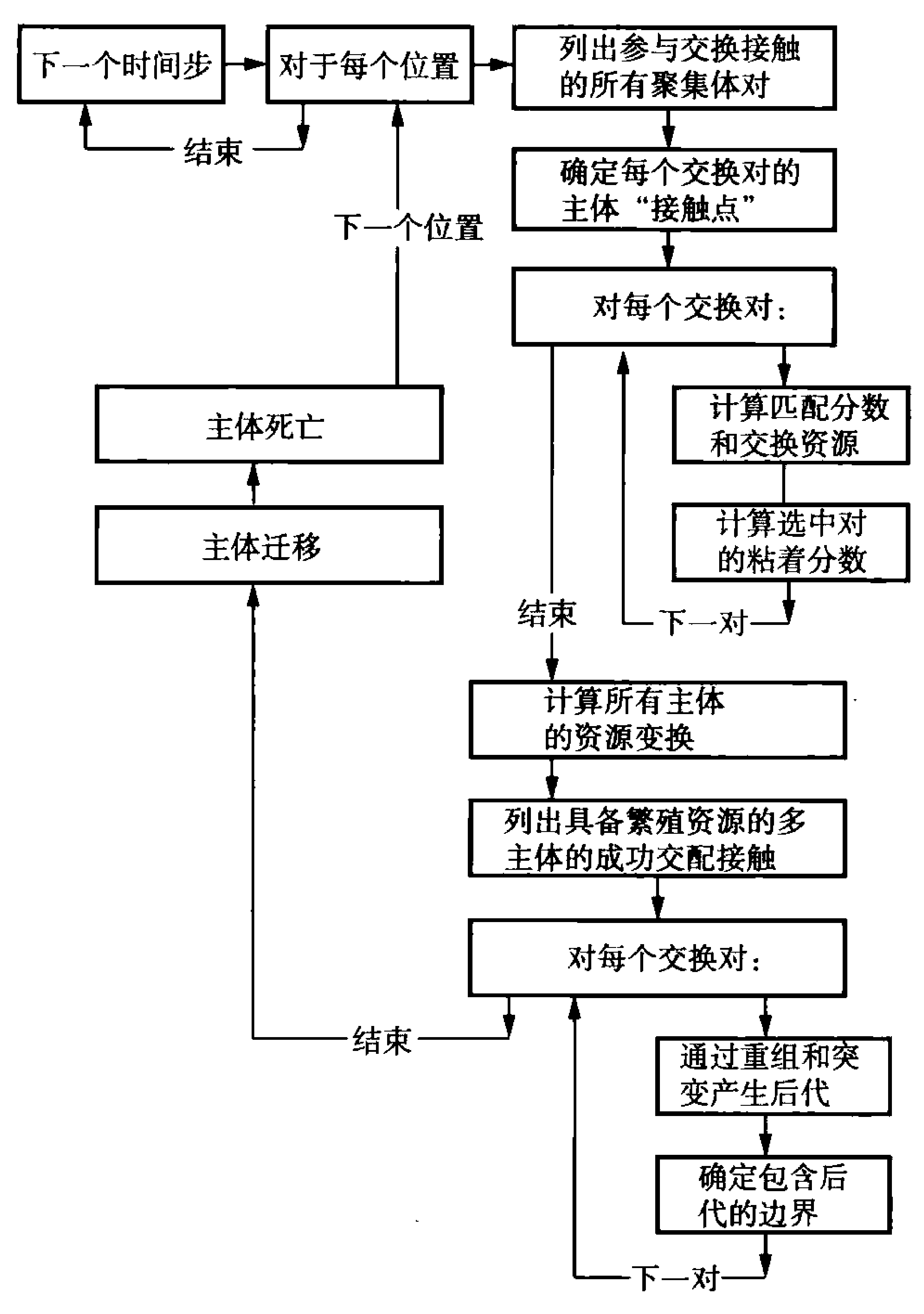


图 3.11　回声模型模拟的流程图

第三节　复杂系统的适应维生方法

复杂适应系统理论(CAS)是霍兰提出来的一个复杂性理论分支,其基本思想是“适应性造就复杂性”。所谓具有适应性,就是指它能够与环境以及其他主体进行交互作用。主体在这种持续不断的交互作用的过程中不断地“学习”或“积累经验”,并且根据学到的经验改变自身的结构和行为方式,并引起整个宏观系统的演变或进化。CAS 理论从主体间的适应性来分析了组织产生之后主体

之间如何适应和维生的问题，揭示出复杂组织在适应的过程中产生的维持组织生命的稳定机制和模式，论证了适应性如何造就维生性，科学地解释了复杂组织的维稳机理。因此，CAS 理论揭示了复杂组织的维生机理，为我们分析复杂组织的维生机制提供了方法工具。

一、内稳定态：复杂系统的存在前提

根据霍兰的涌现理论，所谓组织的涌现是由生成主体相互作用，按照受限生成的各种规则限制和自组织放大，并经过学习和适应，与组织环境构成了良好生态关系，经过涌现生成这一过程，复杂组织从无到有，从组织构件变成了现实的复杂组织。[①] 生成主体经过涌现生成，主体元素从无序到有序，从无组织到有组织，这也就意味着一个复杂组织的诞生过程。有序的组织诞生之后，将沿着什么样的方向和道路发展呢？从植物、动物等生命组织的发展过程我们知道，生命的诞生仅仅是整个生命过程的第一步，生命组织的一生道路还很漫长，还要经过生命的维持、发展进化等一系列生命周期。根据伊查克·爱迪思的研究，一个企业组织也需要诞生、发展、稳定、衰落、死亡等一系列生命周期。[②] 所以组织的诞生是整个组织生命周期的第一步，整个生命周期像拉开大幕的戏一样，精彩的大戏才刚刚开始。

随着混沌理论的兴起，蝴蝶效应越来越被人熟悉。今天北京植物园里的一只蝴蝶，轻轻扇动它的翅膀，它引起的小小的气流变化却在三个月后在美国的纽约引发了一场龙卷风。甚至蝴蝶翅膀的扇动向左或向右偏离一毫米，还可能决定风暴是最终落在俄亥拉马州还是墨西哥州。一根小小的火柴，不知什么时候引燃了一场森林大火，费时数月才被扑灭。事物之间的联系敏感到令人不可思议的地步，一点小小的不确定性，会使整个系统的前景完全不可预测。现代混沌理论的研究始于 20 世纪 60 年代，当时人们慢慢地意识到十分简单的数学方程能成为完全同瀑布一般猛烈的一些

---

①约翰·H. 霍兰. 涌现——从混沌到有序[M]. 陈禹，译. 上海：上海科技出版社，2001：1-8.
②伊查克·爱迪思. 企业生命周期[M]. 赵睿，译. 北京：华夏出版社，2004：11.

系统模型。输入的微小差别可能很快成为输出的巨大差别。这种现象被称为“对初始条件的敏感依赖性”。①

混沌理论告诉我们,一个确定的系统经过非线性相互作用,有可能产生出不确定性,结构稳定有序的系统经过非线性相互作用后,可能变成无序和失稳,从有序可能走向混沌。“任何一种存在都处于内外不确定性干扰的包围之中,我们称其为现实世界的不确定性背景。”②也就是说,自然界中的真实系统无时无刻不处于系统内部和外部的各种干扰之中,没有哪一个系统能够保持内外部环境永远不变。从内部来说,确定的系统只要有非线性相互作用就有可能产生出不确定性。从外部来说,作为系统输入的环境处于不断地变化之中,环境的变化千姿百态,几乎无法对它进行完全的控制。差之毫厘的环境输入都有可能导致谬以千里的系统输出。一个组织涌现生成之后,必然要面对各种各样的变化环境,由混沌理论看来,该组织涌现生成之后马上就将面临解体崩溃,因为它无法应对组织内外的不确定性。但是,现实世界中,许多组织在涌现生成之后都能够保持稳定,比如大部分植物都能维持一年或多年的生命,大部分动物都能维持长久的生命,例如人类的平均寿命已经达到70多岁。由此可见,现实世界中的组织一般都不是方生方死,方死方生,而是能够保持一定的稳定性。也就是说,组织系统一般都具有维持生存或生命的能力。在现实世界中涌现生成的系统都有一定的自我保持能力,或称维生能力。内外条件发生变化不可避免,系统的组分及其相互关系也会随之而有所变化,但由于系统具有维生能力,系统的基本结构、特性和行为模式仍能保持不变,使人们足以对其进行辨识。③

生理学家坎农早在20世纪30年代就开始思考组织的维生能力问题,并提出了内稳态的概念。控制论的创始人维纳则提出了反馈机制特别是负反馈来解释系统的稳定性。随后艾什比将其归结为更普遍的形式——学习机制。“内稳定态有着双重含义,一方

---

①詹姆斯·格莱克.混沌[M].张淑誉,译.北京:高等教育出版社,2004.8.

②金观涛.系统的哲学[M].北京:新星出版社,2005.213.

③苗东升.系统科学精要[M].北京:中国人民大学出版社,2006:40.

面它是一种高级适应机制。但另一方面，它恰恰又是普遍存在的保持功能耦合稳定的机制。"[①]金观涛在其《整体的哲学》中比较系统地提出了组织的维生功能和维生结构问题，并用功能耦合理论进行了比较系统的解释。[②] 他的解释是对组织维生能力和维生结构的科学与哲学研究的重要探索。随着当代复杂性科学的发展，组织维生机制的科学研究又有了新的突破，并为我们探索组织维生的哲学方法论提供了新的科学依据。

近年来，复杂系统的鲁棒性(robustness)成了科学研究的热门领域。虽然鲁棒性目前还没有一个统一的含义，但我们可以把它理解为一个系统面临内部结构或外部环境的改变时能够维持其功能的能力。[③] 在不确定性和危机出现的情况下，鲁棒性已经成为系统能否生存下去的关键。例如，生态系统会遇到来自环境或大或小的干扰；细胞组织会遇到环境变化或发生遗传变异；计算机软件会遇到输入错误、磁盘故障、网络超载或意外攻击；一款科技产品在风云变幻的市场中受到各种各样的挑战，等等。这些情况都要求组织系统必须具有一定的鲁棒性。如果组织系统不能在干扰的环境中生存，那么它就不可能在现实世界中长期存在。正像哲学家黑格尔所说的名言：存在的就是合理的。现实世界中的组织系统并不像混沌理论所说的那样脆弱和不稳，而是一般都具有一定的抗干扰性和维生能力，能够合理地存在。

对组织系统维生机制进行全面揭示的最新研究要数美国学者霍兰的复杂适应系统理论(Complex Adaptive System，简称 CAS)。因为霍兰专著的书名《隐秩序——适应性造就复杂性》，学者们普遍认为复杂适应系统理论主要是研究适应性如何带来复杂性，其实该理论的真正目的是希望通过探索复杂系统的适应性来研究组织系统的维生机制，主要试图探索因适应性带来的系统的维生、维稳机制，揭示适应性背后所隐藏着的系统稳定、维持的微观秩序或机理。由系统适应性带来维生性，由维生性带来复杂性，因此更合

---

①金观涛. 系统的哲学[M]. 北京：新星出版社，2005：216

②金观涛. 系统的哲学[M]. 北京：新星出版社，2005：213-244

③陈禹，钟佳桂. 系统科学与方法概论[M]. 北京：中国人民大学出版社，2006：219

适的小标题也许应该是“适应性造就维生性”。其实霍兰在其专著中开宗明义，一开始就以小姑娘彼得逊在超市选货物的故事来展开的：

> 在纽约市一个普普通通的日子里，小姑娘彼得逊(Eleanor Peterson)走进她熟悉和喜爱的商店，直奔其中的一排货架，拿起一罐腌鲱鱼。她有把握地断定，鲱鱼就在那儿。是的，形形色色的纽约人每天消耗着大量的各种食品，全然不必担心供应可能会断档。并非只有纽约人这样生活着，巴黎、德里、上海、东京的居民也都是如此。真是不可思议，他们都认为这是理所当然的。但是，这些城市既没有一个什么中央计划委员会之类的机构，来安排和解决购买和配售的问题，也没有保持大量的储备来发挥缓冲作用，以便对付市场波动。如果日常货物的运输被切断的话。这些城市的食品维持不了一两个星期。日复一日，年复一年，这些城市是如何在短缺和过剩之间，巧妙地避免了具有破坏力的波动呢?①

由这个问题，霍兰开始思考复杂系统是如何维持稳定的，也就是如何维生的问题。他通过市场经济的运作机制、湍流、驻波、生态系统等更多的现象观察分析，得出了一个结论：“每个系统的协调性和持存性都依赖于广泛的相互作用，多种元素的聚集，以及适应性或学习性。”②由此可见 CAS 理论的真正目的是探讨由系统的适应性带来的维生机制问题，霍兰的整个理论就是由此展开的。

二、适应主体：组织维生的基本元素

霍兰把探讨组织系统的维生功能和机制问题转化成为探讨其适应性问题，也就是说要研究组织系统的维生功能和机制首先要从系统的适应性入手。我们在日常生活中虽然经常遇到组织系统

---

①约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧，韩晖，译.上海：上海科技教育出版社，2000：1.

②约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧，韩晖，译.上海：上海科技教育出版社，2000：4.

的适应性问题，这些问题偶尔也会引起学者们的关注，但是以往的科学却没有对适应性进行科学研究，缺乏对适应性进行科学的刻画和科学机理的探讨。霍兰从观察生物、生态、经济、社会等有机系统入手，采用科学的描述手段对组织的适应性进行了科学的刻画，从而寻找到组织维生的基本元素。

以往的科学理论（包括系统科学）都把组成系统的组分叫做元素或要素。传统的科学观受牛顿机械论的思想影响，都把研究对象当做没有能动性和不能思维的机械部件，更有甚者把人也当做机器。因此在处理生物世界和人类社会问题时，我们的科学分析及其结论与现实世界差距较大。比如，在经济学界就有“经济学家一预测，上帝就发笑”的玩笑。霍兰则把构成组织系统的部件称为适应性主体（adaptive agent），简称为主体。① 这虽然是一个名称问题，但其中包含着不同的科学观。所谓具有适应性就是指它能够与环境以及其他主体之间进行交流，并在交流中“积累经验”和“学习”，据此改变自身的结构和行为方式。霍兰从系统的基本构件上就强调了它的能动性和灵活性，而不是如同被动的机器，这是组织涌现生成、持存维生和进化发展的逻辑基础。正是适应性主体具有能动性、适应性的特点，使得他的 CAS 理论能够运用于经济、社会、生态等其他方法难于企及的复杂系统中，并能够与实际系统比较吻合。

适应性主体具有学习和适应的功能，因此必须具备一些基本特征。霍兰把这些特征称为特性和机制，并把它归纳为七个基本点，其中包括四个特性和三个机制。这四个特性是：聚集性、非线性、网流性和多样性；三个机制是：标识、内部模型和积木。这七个基本点我们在上一节中已经做了详细的介绍，在此就不再重复。其实所谓的特性就是适应性主体必须具备这四个方面的特殊性能，而所谓的机制就是适应性主体形成适应性的微观机理。霍兰通过这七个基本特征的不同组合来描述主体的适应性，进而对单个主体的适应机理和多个主体间的适应模式进行了刻画。他还试

①约翰·H. 霍兰. 隐秩序——适应性造就复杂性[M]. 周晓牧，韩晖，译. 上海：上海科技教育出版社，2000：4.

图揭示出一般原理,使我们能从简单的规律中综合出复杂的 CAS 行为,其实也就是希望找到组织系统的一般维生机理。

霍兰继续以纽约市为例来说明如何用主体的四个特性和三个机制的组合来描述 CAS 及其适应、维生机理。① 作为适应性的主体首先应该具有聚集特性,在城市里由聚集而成的主体的典型代表是星罗棋布的公司,从各种各样的银行和证券交易机构到遍布各个大街小巷的小便利店和出租车。这些主体确定了每一笔的实际交易,因此城市可以用这些主体不断进行的相互作用来很好地加以描述。我们只要看看城市里遍布每个角落的广告、商标和公司标志,就清楚标识是如何促进和指导这些交易的。这些标识的多样性强调了城市中公司等主体及其活动的不同,以及货物的进、出、经过城市而产生的复杂的网络流。尽管城市变化不断,呈现出惊人的多样性,而且还没有一个中央指挥系统,但无论是从短期还是从长期来看,它都保持了协调性和和谐性。城市的运作还体现了非线性的作用,城市的非线性尤其体现在促成交易的内部模型,即公司内部的模型上。这些模型形形色色,也体现了多样性,如公司计划、账目表格、公司策划方案等,还有各种投资策略,等等。传统的分析方法,特别是线性分析方法对这些活动很难进行分析。霍兰认为,如果我们能找到通过不断组合确定城市外表特征的积木,就会对其有一个全新的认识。②

由城市这个例子中,我们可以看出,适应性主体的特性可以由其七个特征参数来刻画,于是霍兰提出一个判断标准。他认为,凡是 CAS 系统都具有上述七个方面的特征,反过来,凡是具有上述七个方面特征的系统都是 CAS,因此他说:"要用一个采纳这些基本性质的共同框架来看待所有的 CAS",③为此我们要为不同的主体找到一个共同的说明,也就是寻找到共同的维生机制。

---

①②约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧,韩晖,译.上海:上海科技教育出版社,2000:41.

③约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧,韩晖,译.上海:上海科技教育出版社,2000:42.

三、规则选择：单主体的适应行为

主体个体是构成组织系统的要素，主体个体的适应性是群体和系统适应性的基础，也是系统维生的最基本层次。霍兰将 CAS 看成是由用规则描述、相互作用的主体组成的系统。“这些主体随着经验的积累，靠不断变换其规则来适应。在 CAS 中，任何特定的适应性主体所处环境的主要部分，都由其他适应性主体组成，所以任何主体在适应上所做的努力就是去适应别的适应性主体。这个特征是 CAS 生成的复杂动态模式的主要根源。”①

霍兰从三个层面来揭示主体个体的适应机能，即维生机理。首先是主体的因果规则行为模式；其次是在多条因果规则下如何选取规则；最后探讨这些因果规则的产生机制。这三个层面是一步步展开的，从既有的单个规则如何运作，到多条规则如何选择，最后揭示这些规则如何发生，这些问题一个比一个深入。

（一）主体个体的因果规则

在这个层面，霍兰不关心规则的发生问题，也不讨论多条规则下的运作机理，只探讨在现有规则而且是单条规则下，主体是如何运作的。我们一直对有机体对环境的适应以及目的性充满好奇，认为这是有机体的特有性能。活力论更是把它神秘化，认为生命体中存在一种有目的、超物质、神秘的“活力”，被称为“隐得来希”，它支配着生物体内的物理、化学过程和整个生命过程。由此他们认为有机界和无机界完全是两个世界，无机界遵循因果规律，而有机界则不完全按照因果规律行事。霍兰则告诉我们，从最基本的机制来说，适应性并不神秘，它不排斥因果性，相反它一样必须符合因果性原则。没有任何一门真正的科学是违反因果性原则的，凡是违反因果性原则的基本上可以被判断为伪科学。

单个主体的基本行为模式并不神秘，一样按照最简单的因果规则，即 IF（一些条件为真）THEN（执行一些动作）。IF/THEN 规

---

①约翰·H. 霍兰. 隐秩序——适应性造就复杂性[M]. 周晓牧，韩晖，译. 上海：上海科技教育出版社，2000：10.

则在心理学上叫做刺激-反应规则，在人工智能上被称为条件-行动规则，在逻辑学上叫做产生规则。霍兰要为 IF/THEN 规则找到一个简单的语法，一直适用于各种主体的语法，并加入一些简单的修改，使之能够用来描述各种复杂适应主体的适应性行为。

霍兰使用的 IF/THEN 规则的语法，严格依赖于主体与其环境的相互作用，也就是说主体通过对刺激的分类来感知环境。霍兰把它扩展为执行系统，这个执行系统由三个基本元素构成：一组探测器，一组 IF/THEN 规则和一组效应器。“探测器表征主体从环境中抽取信息的能力；IF/THEN 规则表征处理那些信息的能力；而效应器则表征它作用于环境的能力。这三个元素都是抽象的、剔除了机制的细节，可应用于不同种类的主体。”①霍兰通过消息录和规则表把执行系统细化为消息传递执行系统。通过消息传递执行系统，适应性主体既没有超出因果性原则，又产生了最基本的适应性行为。

（二）复杂环境下的规则选择与适应

上述的因果规则只是刻画了主体面对单个规则时的应对性行为，但是主体不可能在这样单一的环境中生活，它必须面对变幻莫测的复杂环境。要描述变幻的实际环境，必须使用许多因果规则，由因果规则的集合来共同表征。主体面对诸多的因果规则，该如何选择和行动了呢？在由多条规则构成的可能性空间里，主体必须作出抉择。根据环境的变化，选择不同的因果规则，从而刻画出主体面对环境的适应行为。

为了对规则进行比较和选择，首先要把假设的信用程度定量化，为此我们给每一条规则一个特定的数值，称为强度（Strength），或者按照遗传算法的名称，称之为适应度（Fitness）。每次需要使用规则的时候，系统按照一定的概率选择，具有较大强度或适应度的规则有更多的机会被选用。在这个基本算法的基础上，还可以加入内部模型和缺省层次等思想，使得规则的选择更加灵活，更加

---

①约翰·H. 霍兰. 隐秩序——适应性造就复杂性[M]. 周晓牧，韩晖，译. 上海：上海科技教育出版社，2000：87.

符合现实的系统行为。“信用分赋值的本质是向系统提供评价和比较规则的机制。当每次应用规则之后，个体将根据应用的结果修改强度或适应度。”①这实际上就是“学习”或“经验积累”。霍兰把它称为“信用分派”机制。

现在的问题是面对多条规则究竟选择哪一条？也就是把信用分派给哪一条？霍兰引进博弈算法理论，向系统提供预知未来结果的假设，强化能够用于后期使用的规则，公开地对其活动进行奖赏。当根据因某个行为产生直接的赢利（如奖赏）的时候，信用分派根据赢利直接进行奖赏。当执行系统有很多规则同时起作用时，信用分派可以引进拍卖竞价的竞争机制，那些获得好处的行为规则最终会获得加强，其处理过程就等于涉及创造条件和子目标假设的循序渐进的认证。竞争在 CAS 中十分普遍，它是用于描述适应性主体行为的信用分派方法的基础。

（三）因果规则的产生机制

上述的规则都是既成的，是在现有规则的条件下，主体怎么运作和选择，问题是这些规则来自何方？换句话说就是，这些规则究竟是如何产生的？对于规则的产生，首先想到的就是试错法。这种试错法特别为科学哲学家波普尔所推崇，认为从变形虫到爱因斯坦都在使用，他由此提出“大胆假设，小心求证”的科学研究方法。问题是，这种试错法没有经验的积累，不能充分利用遗忘积累的经验。它对已存在的规则做有限的随机修改，就像抛硬币，下一次的发生并不依赖过去的发生的经验。

在现实世界中，许多有机体特别是各种动物都特别会利用过去的经验，新的创造往往都是建立在过去经验的基础上，是对过去经验的继承和创新，是在充分利用过去经验的基础上才有的创新。霍兰在这里引进他自己先前创立的遗传算法思想来阐述如何发现或形成新的规则，从而提高个体适应环境的能力。这里的基本思想是，在经过测试后比较成功的规则之基础上，通过交叉组合

①陈禹，钟佳桂．系统科学与方法概论[M]．北京：中国人民大学出版社，2006：219.

(crossover)、突变(mutation)等手段创造出新的规则来。[①] 需要注意的是,由于在这里是基于经验来进行新规则的创造,所以比纯粹根据概率去查找和测试一切可能性要快得多,效率也高得多。

规则发现,合理假设的生成,集中在经过测试的积木块的使用上。过去的经验会直接体现出来,同时创新有着广阔的空间。这种积木块重新组合的特殊方法在遗传学上用得很多,但任何一个具有普遍性的过程都可以用这种方法抽象出来。

四、回声模型:多主体的相互作用和维生

实际的组织不可能由一个主体构成,而是由许许多多的主体相互作用、相互适应,共同构成一个有生命力、有适应力的系统。多个主体构成的系统,主体群体之间、主体与环境之间怎么学习与适应呢? 这就是主体群体的维生机制问题。霍兰通过其构造的回声模型(echo model)来描述其适者生存的运作机制。霍兰的回声模型分三步来完成其刻画。

(一)种群所需的环境条件

主体群的适应与生存离不开其环境的支持,那么环境与主体群是怎样交流和支持的呢? 霍兰认为主要通过资源(resource)和位置(site)两个条件因子。这两个参数是主体群存在的基本环境,是主体群生存的基础条件。[②]

根据普里高津的耗散结构理论我们知道,只有开放系统才能走向有序,系统只有通过环境的交流,从环境中获得物质、信息和能量才能维持生存。霍兰则提出资源这个概念来刻画主体群与环境之间的交流。所谓资源是指系统所需要的物质、信息和能量等输入条件。它是一个十分抽象也是十分广泛的概念,例如水、石油、矿产、资金等等,霍兰用字母来抽象表示,比如用[a,b,c,d]代

①约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧,韩晖,译.上海:上海科技教育出版社,2000:71-76.

②约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧,韩晖,译.上海:上海科技教育出版社,2000:99.

表四种资源。其实它代表系统所需的物质、能量、信息等外在条件。

真实系统的存在都需要一个环境空间或者叫地理环境，这是组织存在的基本空间条件。相互连接的位置形成了回声模型的地理环境。每个位置皆由资源泉源（即该位置处基本资源的上涌）所刻画。资源量因位置而异，可以是零也可以很多。主体在多个位置上交互作用，一个位置也可以容纳多个主体。

（二）回声模型的基本结构

主体之间要相互作用，主体必须要有其微观结构，以往我们一直只是说会有相互作用，但究竟怎么相互作用？其作用机制如何？这些问题一直是模糊不清，霍兰则用回声模型来进行微观的刻画。回声模型的基本模型具有最简单的功能：进攻、防御和仓储。[①] 它能够寻找交换资源的其他主体，与其他主体进行资源交换、加工和保存。该模型的主体由三部分组成：

进攻标识（offense tag）：用于主动地与其他主体联系和接触。

防御标识（defense tag）：用于其他主体与自己联系时决定是否应答。

资源库（reservoir）：存放所收集到的各种资源。

其中，存放所收集资源的资源库可以由资源字母组成，进攻和防御标识构成表示主体能力的“染色体”串。模型中所有的交互活动都受这三个标识的调节控制。这个基本模型的功能包括：主动与其他主体接触，同时对其他主体的接触进行应答，如果匹配则执行资源交换，在自己内部存储于加工资源；如果资源足够，则繁殖新的主体。也就是说，当两个主体在某个位置相遇时，一个主体的进攻标识与另一个主体的防御标识进行匹配，目标是利用匹配性来确定资源在主体之间怎样进行交换，当匹配时就获取或占有对方的资源。例如，在生态系统的食物链中，狼、羊、草形成一个食物链，狼的进攻标识与羊的防御标识匹配，羊的进攻标识与草的防御

---

①约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧，韩晖，译.上海：上海科技教育出版社，2000：102.

标识匹配,狼吃羊,羊吃草,以获取自己的生存延续。一个主体获取资源的能力与它的进攻标识和其他主体或位置的防御标识的匹配程度成正比,反之,它防守资源的能力则与其防御标识和其他主体的进攻标识的不匹配的程度成正比。一个主体只有在收集了足够的资源能够复制其染色体串的时候才能进行繁殖。主体繁殖后代的能力隐含在资源收集能力中。

(三)主体群体间的交流机制

基本回声模型中主体的结构还太简单,难于描述实际主体之间的相互作用,于是霍兰提出了其扩展模型,以便能够模拟从单个"种子"逐渐演变成为一个有组织的、复杂的聚集体的过程,能真正描述主体间的相互作用,形成完整的功能耦合系统。除了基本模型提供的标识调节交互和繁殖之外,霍兰再给原始主体增加了五种机制①:

(1)增加"条件交换"功能,即允许选择性交互作用的机制。交互条件检查另一个主体的标识,以确定交互作用是否能够发生。两个主体并不是只要相遇就可以进行交互作用,还要看是否符合相互作用的交换条件。

(2)增加"资源变换"功能,即允许资源变换的机制。主体将被赋予把一种资源变换成另一种资源的能力,其代价是必须收集足够的资源,以便在染色体字符串中定义一种变换片段。有了这个机制,主体就具备了加工、利用好重组资源的能力,可以把富余资源变换成为繁殖所需的资源。增加这一功能为主体的分工和专门化开辟了途径。

(3)增加"黏着"功能,即确定主体相互黏着的机制。黏着机制提供了一种形成多主体聚集体的方法。主体选择性地相互黏着,并且形成"层次",结果它们能够作为一个整体运动和交互活动。聚集体中的单个主体通过代代相传,可以逐代适应,并充分利用聚集体中其他主体提供的特定环境。聚集体中一个主体可以专门进

①陈禹,钟佳桂.系统科学与方法概论[M].北京:中国人民大学出版社,2006:115-116.

攻或防御，而另一个则专门获取资源。如果这两个主体交换合适的资源，那么聚集体和其中的主体将会更有效地收集和保护资源，从而更迅速地繁殖。

(4)增加"选择性交配"功能，即允许选择性交配的机制。选择性交配(selective mating)为主体提供了一种从若干配偶中选择配偶的方式，只和选中的配偶个体进行交换(这就是回声模型中的物种起源)。主体可以有选择地与其他主体结合，通过交叉组合形成新的更强的主体。一对拥有足够繁殖资源的主体，只要它们的交配条件相互满足，就通过交配繁殖后代。

(5)增加"条件复制"功能，即条件复制机制。复制条件检查同意多主体聚集体中其他主体的活动。即使一个主体拥有足够的资源可以复制它的染色体字符串，也只有当它的复制条件由多主体中其他主体的活动所满足以后，它才可以繁殖。这个机制可以调节基因的开启和关闭。

增加了上述五个功能的主体模型已经比较接近实际中的主体模型，可以比较真实刻画现实世界的许多真实组织，比如植物、动物和人类社会。模型中的主体，其染色体包括两个部分：标志片段和控制片段。染色体为主体提供三个标志、三个相互作用条件、一种资源转换的能力和一种控制主体处于活动或不活动状态的方法。①

标志片段包括三个标志：进攻标志、防御标志和黏着标志。两个主体相互作用的时候，一个主体的进攻标志与另一个主体的防御进行匹配比较，以决定两个主体之间交换的资源数量。进攻标志还用于限制条件交换、配偶选择和条件复制相互作用。黏着标志则用来决定两个相互作用主体之间的黏着程度。

控制片段包括三个对象：条件、资源转换和一个活动标志。

(1)条件有三个：交换条件，交配条件和复制条件。每当两个主体配对进行相互作用时，一个主体的每个条件都会检查另一个主体的染色体中的进攻标志，以决定相互作用是否继续进行。

---

①约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧，韩晖，译.上海：上海科技教育出版社，2000：133-134.

(2)资源交换的次数可以是任意值。每次都指定一个源资源和目标资源;如果资源库中有相应的资源,就会通过资源转换,以一定速度转换成目标资源。

(3)控制片段中有一个标志。如果标志为"1",多主体就会使用该主体的标志来调节其相互作用;否则多主体就会忽略主体的存在,好像这个主体并不存在于多主体这个聚合体中。

通过回声模型,霍兰比较细致地刻画了多个主体的情况下,主体间如何相互适应,组织系统如何产生适应性的问题。在多主体的情况下,组织面对复杂的内外部环境,能够实现进攻、防御、条件交换、资源变换、黏着、选择性交配、条件复制等功能,完成其对复杂环境的适应。通过这些相互作用的机制,无论环境如何风云变幻,组织系统都能够成功应对,产生适合的内外部环境,并在这些环境中获得其生存能力和发展空间。

五、适者生存:适应性造就稳定性

为什么从系统的适应性能够推论出维生性呢?大家都知道,达尔文进化论最著名的论点是"物竞天择、适者生存",达尔文从论述宇宙万物的竞争、选择开始,探讨了万物间的适应性,但其最终目的还是由此论证了万物存在的合理性。事物如果要存在就必须能够适应变幻莫测的环境,只有能够适应环境的事物才能够真正生存下来。霍兰的CAS理论表面上看起来主要是论述CAS系统的适应性问题,其实其落脚点是系统的维生性问题,由适应性来论证维生性的机理,或者说论证适应性造就维生性和稳定性。因此,CAS理论对复杂系统的适应性分析其实就是系统维生性的科学刻画和分析,是组织系统的维生分析方法,我们可以把它称为"适应维生方法",它是一种组织系统分析的科学新方法。

霍兰的CAS理论从作为基本元素的适应主体开始,通过主体的七种基本特性和机制,赋予了主体能动性,然后通过单个主体的适应行为以及多个主体的回声模型科学地刻画了复杂系统主体的适应性行为、机制和模式,揭示了系统主体间以及系统和环境间相互适应的微观机理。不过,刻画适应性并不是CAS理论的最终目的,而是由此揭示了复杂系统的维生机制。霍兰对CAS理论的刻

画，其实也是对复杂系统的维生机理分析，这就为我们提供了一种分析系统维生行为和机理的科学方法。

第四节　适应维生方法的分析工具：swarm

复杂适应系统理论（CAS）在各个领域得到了广泛的应用，但却不容易为各界人士所掌握。为了将 CAS 思想和方法方便地运用于各行各业，圣菲研究所（SFI）开发了基于 CAS 建立模型而设计的软件平台，也就是说，这个平台是建立在 CAS 理论研究基础上的。通过"相对简单的微观个体活动可以突现出宏观层面的复杂行为"，给社会科学的研究与实践乘上当代新技术的航班打开了通路。从 1994 年开始，SFI 开展了一个研究项目，开发一个工具集用来帮助科学家们分析 CAS，这个模拟工具集就叫做 swarm。

swarm 是一个用于研究多主体复杂系统的模拟试验平台，可以在 Unix，Solaris，Linux，Unix HP/UX，Windows 95/98/NT 等操作系统上运行。它为复杂系统的模拟提供了一个标准的软件工具集。在 swarm 环境中，可以建立一系列独立的个体，通过独立事件之间的交互，考察和研究系统的行为和演化规律。由于 swarm 没有对模型和模型要素之间的交互作任何约束，因此它没有特定的工作领域的限制，可以应用于经济、生物、物理等各门学科。

swarm 项目的目的就是通过科学家和软件工程的合作制造一个高效率的、可信的、可重用的软件实验仪器。它能给予科学家们一个标准的软件工具集，就像提供了一个设备精良的软件实验室，帮助人们集中精力于研究工作而非制造工具。研究人员可以自由定制 swarm 中的多种对象，通过调用系统现有的类库，可以简化模拟工作。用户也可通过在自己的程序中引入 swarm 的类来建模。基于面向对象的思想，可以应用 Objective-C，JAVA 两种语言进行程序设计。

一、swarm 的建模思想

swarm 软件用来给复杂性个体（即主体）行为建模，用于对经济

行为的复杂性研究仿真。它是在美国新墨西哥州的圣菲研究所(SFI)得到开发的。SFI 和政府及一些个人为 swarm 的发展提供了资助,它的发行得到了 GNU 库的认证和许可。它的文档和例程,以及软件和开发工具的 Alla 部件,作为可执行部件和源代码,可从网上免费得到。

swarm 是使用 Objective C 语言开发的,在早期的版本中编写 swarm 的应用程序也是 Objective C,从 swarm 2.0 版开始提供了对 Java 语言的支持,将来可能支持 JavaScript,C++,Python,Perl 等语言。swarm 的最新版本 swarm 2.1.1 可以在不同版本的 Unix,Linux,Windows 95,Windows 98,Windows NT,Windows 2000 环境下运行。

用户可以使用 swarm 提供的类库构建模拟系统,使系统中的主体和元素通过离散事件进行交互。由于 swarm 没有对模型和模型要素之间的交互作任何约束,swarm 应当可以模拟任何物理系统或社会系统。事实上,在各个广泛的研究领域都有人在用 swarm 编写程序,这些领域包括生物学、经济学、物理学、化学和生态学等。

swarm 项目的目的就是通过科学家和软件工程师的合作制造一个高效率的、可信的、可重用的软件实验仪器。它能给予科学家们一个标准的软件工具集,就像提供了一个设备精良的软件实验室,帮助人们集中精力于研究工作而非制造工具。

swarm 实际上是一组用 Objective C 语言写成的类库,这是一种面向对象的 C 语言。一部分图形界面,如图表、按钮和窗口是用 TCL/TK 描述的。swarm 最初只能在 Unix 操作系统和 X Windows 界面下运行。1998 年 4 月,伴随着 1.1 版的发布,swarm 推出了可以在 Windows 95/98/NT 上运行的版本。1999 年,swarm 又提供了对 Java 的支持,从而使 swarm 越来越有利于非计算机专业的人士使用。

swarm 平台是基于主体的建模工具,建模方法是自底向上先构筑每个实体主体,再将这些主体组装起来形成整个系统模型。在 swarm 平台上,swarm 是基本构件,一个 swarm 就是一个对象,实现内存的分配和事件的规划。在建模编程时,可以认为一个 swarm 就是一个主体。主体通过规划技术来安排自己的行为,也可以认为一个 swarm 是有多个主体的某个组织。swarm 用规划技术对这些

主体的行为进行规划,安排它们的执行顺序。swarm 还为多层次建模提供强有力的表达方法,把一组个体就像一个单独的个体一样,紧密地联系起来。个体行为的不同组合决定并影响着群体行为;反过来,群体行为作为一种环境,对个体行为的选择产生影响,进而个体行为的选择又决定并影响着群体行为。如此循环往复,其结果是个体行为逐渐适应群体及环境的能力得到提高,群体行为本身演化过程得以进化,实现用 swarm 来建立多层次的动态仿真模型,模拟 CAS 的行为。

二、swarm 的逻辑结构

swarm 中最主要的四个部分,往往也是一个 swarm 模拟程序经常包括的四个部分是:模型 swarm(Modelswarm)、观察员 swarm(Observerswarm)、模拟主体和环境(图 3.12)。

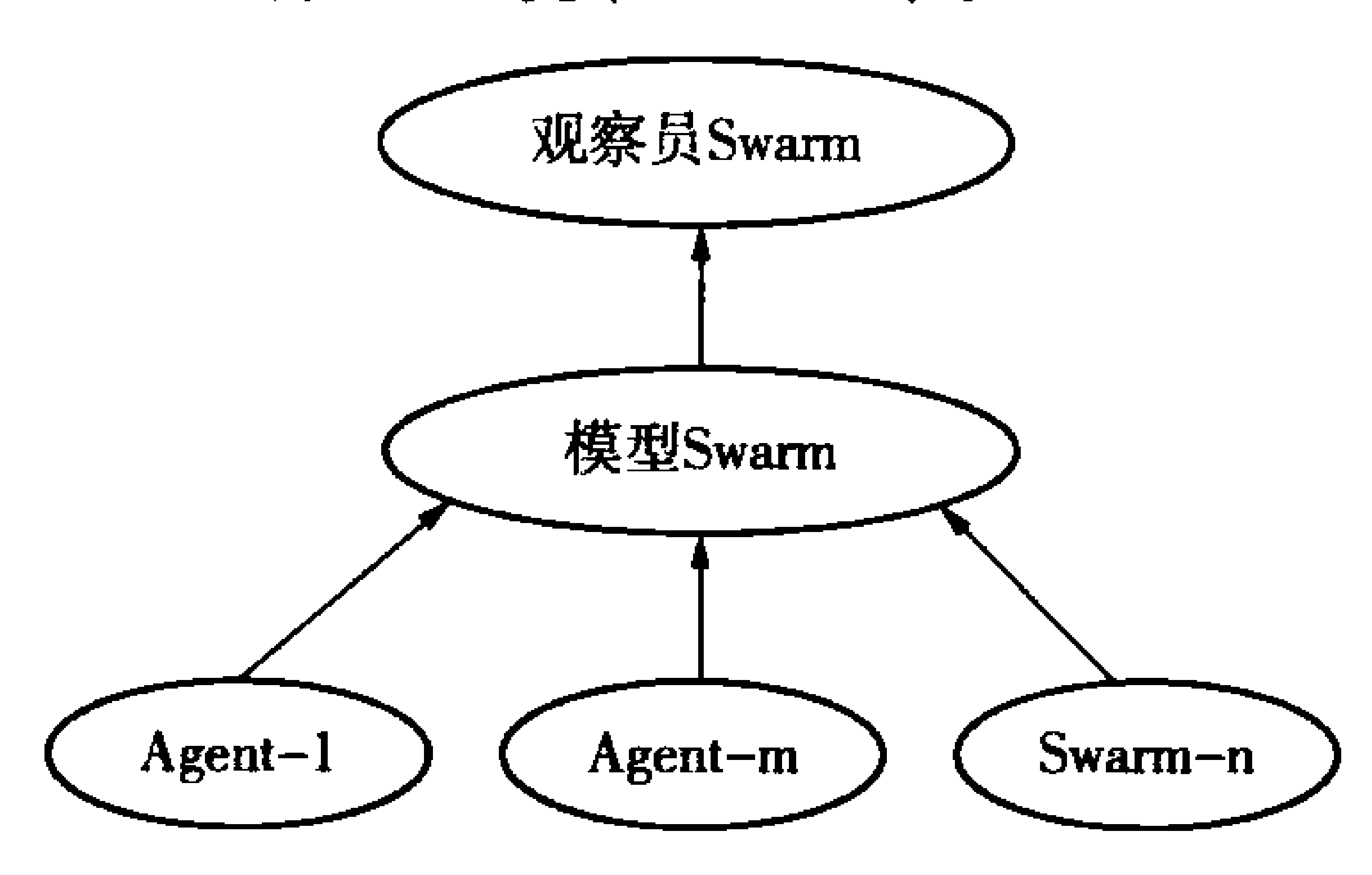


图 3.12　swarm 仿真程序的构件结构

(一)模型"swarm"

通常情况下,swarm 应用包括两个 swarm 对象,位于核心的是 Modelswarm,一个封装了被模拟的模型的 swarm 对象。Modelswarm 中的每一个对象对应模型世界中的每一个主体。当用户定义了全部对象并为它们建立起关系后,建模的最后一步就是把这些主体放到这个 Modelswarm 对象中。swarm 就是许多个体(对象)组成的一个群体,这些个体共享一个行为时间表和内存池。显然"swarm"有两个主要的组成部分:①是一系列对象(Object);②这些对象的行为时间表(Action)。时间表就像一个索引,引导对象动作的顺序执行。

1. 对象

模型"swarm"中的每一项对应模型世界中的每一个对象(个体)。"swarm"中的个体就像系统中的演员,是能够产生动作并影响自身和其他个体的一个实体。模拟包括几组交互的个体。例如,在一个经济学模拟中,个体可能是公司、证券代理人、分红利者和中央银行。

2. 时间表

除了对象的集合,模型"swarm"还包括模型中行为的时间表。时间表是一个数据结构,定义了各个对象的独立事件发生的流程,即各事件的执行顺序。通过确定合理的时间调度机制,可以使用户在没有并行环境的状况下也能进行研究工作,也就是说,在并行系统下主体之间复杂的消息传送机制在该 swarm 中通过行为表的方式可以在单机环境下实现。例如,在狼/兔子这个模拟系统中可能有三种行为:"兔子吃胡萝卜""兔子躲避狼的追踪"和"狼吃兔子"。每种行为是一个独立的动作。在时间表中,对这三种行为按照以下顺序排序:"每天,兔子先吃胡萝卜,然后它们躲避狼的追踪,最后狼试图吃兔子"。模型按照这种安排好的事件的执行顺序向前发展,并尽量使这些事件看起来像同步发生的。

3. 输入输出

模型"swarm"还包括一系列输入和输出。输入是模型参数:如世界的大小,主体的个数等环境参数。输出是可观察的模型的运行结果:如个体的行为等等。

(二)观察员"swarm"

模型"swarm"只是定义了被模拟的世界。但是一个实验不应只包括实验对象,还应包括用来观察和测量的实验仪器。在 swarm 计算机模拟中,这些观察对象放在一个叫观察员"swarm"的"swarm"中。观察员"swarm"中最重要的组件是模型"swarm"。它就像实验室中一个培养皿中的世界,是被观测的对象。观察员对

象可以向模型“swarm”输入数据(通过设置模拟参数),也可以从模型“swarm”中读取数据(通过收集个体行为的统计数据)。

与模型“swarm”的设置相同,一个观察员“swarm”也由对象(即实验仪器),行为的时间表和一系列输入输出组成。观察员行为的时间表主要是为了驱动数据收集,即从模型中将数据读出,并画出图表。观察员“swarm”的输入是对观察工具的配置,例如生成哪类图表;输出是观察结果。

在图形模式下运行时,观察员“swarm”中的大部分对象被用来调节用户界面。这些对象可能是平面网格图、折线图或探测器,它们一方面与模型“swarm”相连以读取数据,同时把数据输出到图形界面,为用户提供了很好的实验观察方式。实验结果的图形化有助于直觉的判断,但重要的实验都需要收集统计结果。这意味着要做更多的工作并存储用于分析的数据。作为图形观察员“swarm”的另一种选择,你可以建立批处理“swarm”(batch swarms)。它和用户之间没有交互操作。它从文件中读取控制模型的数据并将生成的写入另一个文件中用于分析。它只是观察方式不同罢了。

(三)模拟主体

swarm不仅是一个包含其他对象的容器,还可以是一个不包含其他对象的主体本身。这是最简单的“swarm”情形,它包括一系列规则、刺激和反应。而一个主体自身也可以作为一个“swarm”:一个对象的集合和动作的时间表。在这种情况下,一个主体“swarm”的行为可以由它包含的其他个体的表现来定义。层次模型就是这样由多个“swarm”嵌套构成。例如,你可以为一个居住着单细胞动物的池塘建立模型。在最高层,生成包括个体的“swarm”:“swarm”代表池塘,而每个个体代表池塘里的一个动物。动物的细胞也可以看作是由多个个体(细胞质)组成的“swarm”。这时需要连接两个模型,池塘作为一个由细胞组成的“swarm”,细胞也作为一个可分解的“swarm”。

还由于“swarm”可以在模拟运行过程中建立和释放,swarm可用来建立描述多层次的动态出现的模型。通过建造模型“swarm”

和观察员“swarm”,将模型和数据收集分离开,一个完整的实验仪器就建立起来了。就像一个玻璃下的模拟世界,不同的观察员“swarm”可用来实现不同的数据收集和实现控制协议,但是模型本身没有发生变化。

(四)环境

在模型中,模拟主体通常生活在一个环境中。许多模拟平台将这一环境限定为某一个特定类型,如最常用的是二维网格。swarm 的一个特点在于不必设计一个特定类型的环境。在 swarm 中,环境自身也是一个主体,用面向对象的术语来说就是一个对象。例如,在经济系统中,市场就是一个环境。消费者和商家通过市场来询价和报价,他们的交易也在市场中得到撮合。市场这个主体在模型中可能有一些不同于其他主体的特殊的方法和属性,如市场的参与者或市场的状态等。但是在 swarm 这个模拟系统中它的处理与其他主体没什么区别。

三、swarm 的建模方法

swarm 是一种支持自下而上(bottom-up)的建模工具。这是与 CAS 的层次性相对应的,可以认为每一个主体就是这个层次结构的最底层,需要定义这个主体的具体行为和属性;最底层的上面一层是所有主体所组成的集合——Model swarm,在这一层我们要规定这些主体的整体的行为;最上一层是 swarm 中建立的模拟环境 Observer swarm,它的作用是观察各主体的活动,并以图形或数字的形式表达出来。

把上面四个部件合并起来,就形成了一个完整的研究模型。这种分层设计的思想,分离了模型的数据收集部分和模型的实现部分,这样,模型 swarm 就像一个玻璃罩中的模拟世界,不同的观察员 swarm 可以实现不同的数据收集方式,使用不同的控制协议,相当于在玻璃罩外调节不同的视角,不会对模型本身的运行造成影

响。从宏观上来看,一个完整的 swarm 模型结构如图 3.13 所示。[①]

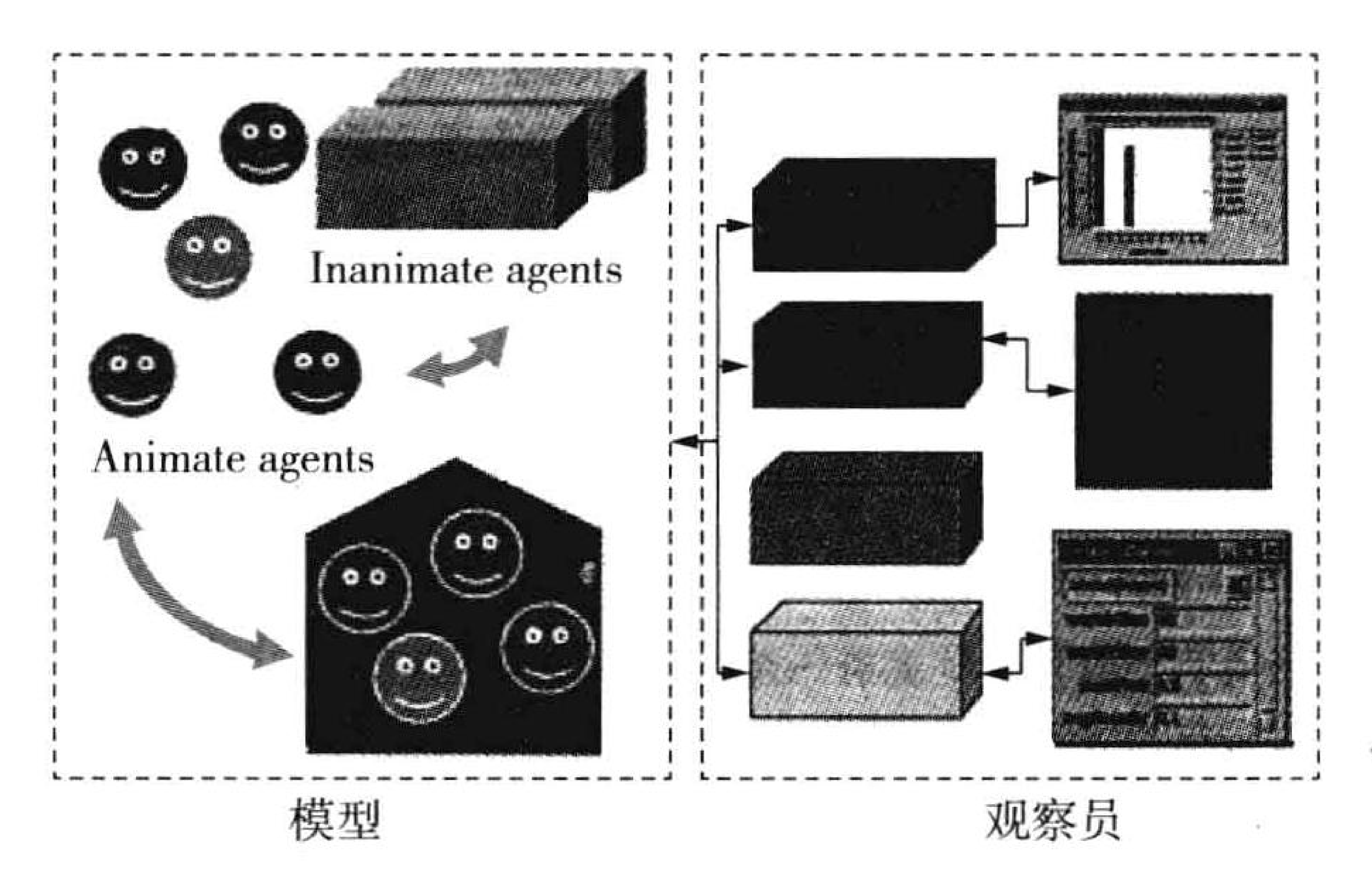


图 3.13 swarm 模型的结构

具体实现的步骤是:

(1)先建立 Observerswarm;

(2)在 Observerswarm 中建立 Modelswarm,作为 Observerswarm 自身的一个子 swarm(Subswarm),并为它分配一定的内存空间;

(3)Modelswarm 建立环境,建立模型的主体以及主体的行为。

四、swarm 的运行原理

swarm 仿真的基本单位是个体,每个个体都能产生动作并影响自身和其他个体。仿真包括几组交互的个体。swarm 除作为个体的容器外,它自身也可以是个体,而个体自身也可以作为一个 swarm,表示一个对象的集合和动作时间表。此时,一个个体的行为可以由它的 swarm 中个体表现的现象来定义。

一个 swarm 仿真程度中包括一个模型 swarm(swarm Model)构件和一个观察员 swarm(Observer swarm)构件。模型 swarm 就是系统模型,包含所有的主体和作为容器的子 swarm,并对其进行实例比。观察员 swarm 包括模型 swarm,并为模型 swarm 的动作提供了空间和时间环境,同时根据要求对模型进行可视化操作(GUI 接

①陈禹,钟佳桂. 系统科学与方法概论[M]. 北京:中国人民大学出版社,2006:142.

口)。swarm 的运行原理可用图 3.14 表示。① 模型运行时,swarm 作为一个虚拟机,其内核执行模型和 GUI 事件,操作系统与 swarm 内核进行交互,而计算机的 CPU 执行来自操作系统的程度指令。swarm 平台是嵌入在现有的操作系统的基础之上的,而 CAS 系统模型的运行在 swarm 内部执行,并将运行结果以图形或数字的形式输出。

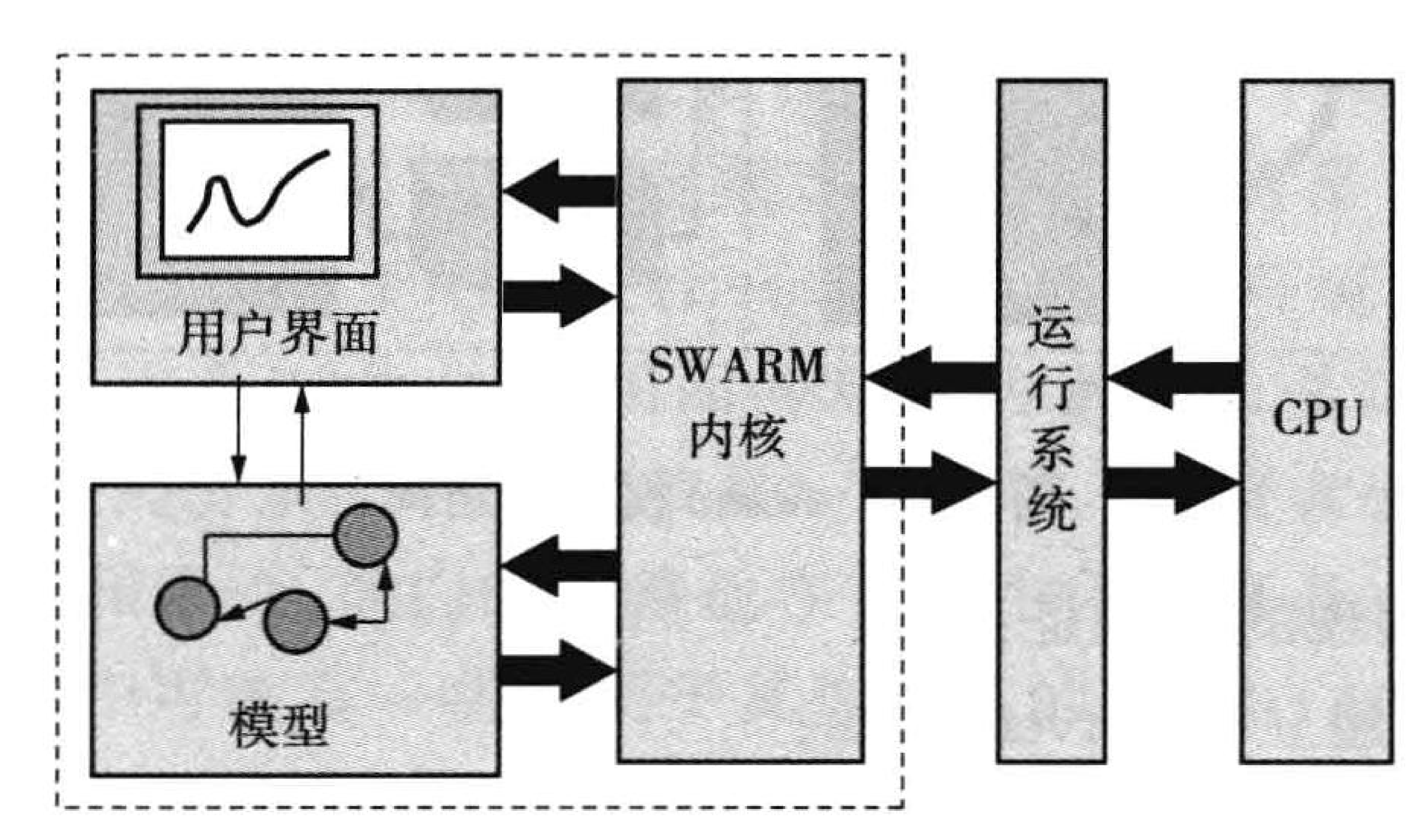


图 3.14 swarm 的运行机理

在这里,我们简要地介绍了应用 swarm 模拟的逻辑结构、运行原理和建模方法,希望读者可以对 swarm 从整体上有一个了解。如果想比较全面了解 swarm 及其应用,可以参考陈禹等学者的相关工作。② 如果想了解使用 swarm 各部分的详细情况,请参阅 swarm 库文档和例子程序,这些工具的完整文档可以在 swarm 的官方主页上找到。

---

①任锦鸾.创新机理:基于复杂性科学的视角[M].北京:科学出版社,2009:43.

②建议读者参阅陈禹、钟佳桂编著.系统科学与方法概论[M].北京:中国人民大学出版社,2006.的相关章节。

第 四 章

遗传进化方法

——复杂组织演化过程分析

进化计算(Evolutionary Computation)理论是一系列搜索技术,它以进化原理为仿真依据,侧重于算法的研究,也称为进化算法。① 它基于生物进化的基本思想来设计、控制和优化人工系统,是信息科学、人工智能与计算机科学的热点研究领域。进化计算模仿自然遗传进化的过程,通常包括选择、重组或交叉、变异、迁移、并行实现等基本算子。进化计算作为一种算法,是一门专门的进化计算技术,但其中也隐藏着一般的科学方法。我们可以从中进行提升,提炼出一般组织的进化原理和方法。从方法论的视野来看,遗传进化方法蕴含着复杂组织的演化机制的一般分析方法,这是一种科学新方法,可以解决长期以来困扰科学界和哲学界关于组织生长和演化的一般机理问题。

第一节　遗传进化理论的兴起

遗传进化理论也叫进化计算理论,进化计算主要有四大流派:遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、进化规划(Evolutionary Programming,EP)、进化策略(Evolutionary Strategy,ES)和遗传编程(Genetic Programming,GP),一般将这类计算方法统称为进化计

①谢金星.进化计算简要综述[J].控制与决策,1997(1):1-7.

算。① 这四个流派的区别在于实现进化过程中使用基本算子的应用比例或侧重点有所不同，但它们都是基于自然进化过程的基本计算模型。其中，遗传算法比较成熟，现已广泛应用，进化策略和进化规划在科研和实际问题中的应用也越来越广泛。遗传算法的主要基因操作是选种、交配和突变，而在进化规则、进化策略中，进化机制源于选种和突变。就适应度的角度来说遗传算法用于选择优秀的父代（优秀的父代产生优秀的子代），而进化规则和进化策略则用于选择子代（优秀的子代才能存在）。遗传算法强调的是父代对子代的遗传链，而进化规则和进化策略则着重于子代本身的行为特性，即行为链。进化规则和进化策略一般都不采用二进制编码，省去了运作过程中的编码—解码手续且更适用于连续优化问题。进化策略可以确定机制产生出用于繁殖的父代，而遗传算法和进化规则则强调对个体适应度和概率的依赖，此外，进化规则把编码结构抽象为种群之间的相似，而进化策略抽象为个体之间的相似。本节中，我们以谢金星对进化计算的综述为基础，对进化计算四大流派的起源、发展、基本思路和研究现状等一般性的问题进行简单的回顾。②

一、遗传进化理论的起源与发展

进化计算的四大流派起初分别创立，独自发展，具有不同的学科发展历史，后来才发现四个流派其实都是建立在生物进化理论基础上的算法理论，具有许多共同点，于是被统一称为进化计算理论。我们先对这几大流派的学科发展历史做一些简单的回顾。

（一）遗传算法

遗传算法是在20世纪60—70年代，由当时在美国密歇根大学的霍兰教授与其学生和同事发展起来的。虽然早在20世纪50年代初期，就有研究人员开始运用数学计算机模拟生物的自然遗传

①余有明，刘玉树．进化计算的理论与算法[J]．计算机应用研究，2005(9)：77-80.

②谢金星．进化计算简要综述[J]．控制与决策，1997(1)：1-7.

与自然进化过程，到50年代末期，已有一些这方面的论文发表，但是当时从事这方面研究的主要是一些生物学家，研究的目的主要是为了更深入地理解自然遗传与自然进化现象。20世纪60年代初，霍兰开始认识到生物的自然遗传现象与人工自适应系统行为的相似性，他认为不仅要研究自适应的系统，还要研究与之相关的环境，因此他提出在研究和设计人工自适应系统时，可以借鉴生物自然遗传的基本原理，模仿生物自然遗传的基本方法。1967年，他的学生 J. D. Bagley 在博士论文中首次提出“遗传算法(Genetic Algorithms)”一词。此后，霍兰指导学生完成了多篇博士论文。

到20世纪70年代初，霍兰提出了“模式定理(Schema Theorem)”，一般被认为是“遗传算法的基本定理”，从而奠定了遗传算法研究的理论基础。1975年，霍兰出版了著名的《自然系统和人工系统的自适应性》①，这是第一本系统论述遗传算法的专著，因此有人把1975年作为遗传算法的诞生年。20世纪80年代以后，遗传算法广泛应用到各种复杂系统的自适应控制以及复杂的优化问题中。

1985年，在美国召开了第一届遗传算法国际会议，并且成立了国际遗传算法学会(ISGA, International Society of Genetic Algorithms)。此会以后每两年举行一次。1989年，霍兰的学生戈德贝格(D. J. Goldberg)出版了《搜索、优化和机器学习中的遗传算法》，总结了遗传算法研究的主要成果，对遗传算法及其应用作了全面而系统的论述。一般认为，这一时期的遗传算法从古典阶段发展到了现代阶段，本书则奠定了现代遗传算法的基础。1991年，戴维斯(L. Davis)编辑出版了《遗传算法手册》，其中包括了遗传算法在工程技术和社会生活中大量的应用实例。

从20世纪80年代开始，有关遗传算法的研究和应用日益普遍。目前，几乎所有领域的研究人员都尝试过遗传算法在各自专业领域的应用，并取得了丰硕的成果。在实际应用过程中，遗传算法也得以进一步完善和发展。如遗传算法广泛用于机器学习领

①J. H. Holland. Adption in natural and artificial systems[M]. Boston: MIT Press, 1992.

域,提出了各种分类系统(CS 或 CFS,Classifier System)。又如,科扎(J. R. Koza)把遗传算法用于最优计算机程序(即最优控制策略)的设计,并称之为遗传规划(GP,Genetic Programming)。

(二)进化规划

进化规划是由美国的福格尔(L. J. Fogel)于 20 世纪 60 年代提出来的。在研究人工智能的过程中,他提出一种随机的优化方法,这种方法也借鉴了自然界生物进化的思想。他认为智能行为必须包括预测环境的能力,以及在一定目标指导下对环境作出合理响应的能力。为了不失一般性,他提出采用“有限字符集上的符号序列”表示模拟的环境,采用有限状态机表示智能系统。福格尔提出的方法与遗传算法有许多共同之处,但不像遗传算法那样注重父代与子代的遗传细节(基因及其遗传操作)上的联系,而是把侧重点放在父代与子代表现行为的联系上。1966 年,福格尔等出版了《基于模拟进化的人工智能》,系统阐述了进化规划的思想。但当时学术界对人工智能领域采用进化规划持有怀疑态度,因此福格尔的进化规划技术与方法未能被接受。

直到 20 世纪 90 年代,进化规划才逐步被学术界所重视,并开始用于解决一些实际问题。1992 年,在美国举行了进化规划第一届年会。此会每年举行一次,从而迅速吸引了大批各行业(如学术、商业和军事等)的研究人员和工程技术人员。

(三)进化策略

进化策略的思想与进化规划的思想有很多相似之处,但它是在欧洲独立于遗传算法和进化规划而发展起来的。1963 年,德国柏林技术大学的两名学生莱辛保尔(I. Rechenber)和斯威福尔(H. P. Schwefel),利用流体工程研究所的风洞做实验,以便确定气流中物体的最优外形。由于当时存在的一些优化策略(如简单的梯度策略)不适于解决这类问题,莱辛保尔提出按照自然突变和自然选择的生物进化思想,对物体的外形参数进行随机变化并尝试其效果,进化策略的思想便由此诞生。

1990 年,在欧洲召开了第一届“基于自然思想的并行问题求解

(PPSN,Parallel Problem Solving from Nature)"国际会议。此后该会每两年举行一次,成为在欧洲召开的有关进化计算的主要国际会议。

（四）进化计算

由于遗传算法、进化规划和进化策略是不同领域的研究人员分别独立提出的,在相当长的时期里相互之间没有正式沟通。直到1990年,遗传算法才开始与进化规划和进化策略有所交流;1992年,进化规划和进化策略这两个不同领域的研究人员首次接触到对方的研究工作,通过深入交流,他们发现彼此在研究中所依赖的基本思想都是基于生物界的自然遗传和自然选择等生物进化思想,具有惊人的相似之处。于是他们提出将这类方法统称为"进化计算(EC)",而将相应的算法统称为"进化算法(EA,Evolutionary Algorithms)"或"进化程序(EP,Evolution Programs)"。

1993年,进化计算这一专业领域的第一份国际性杂志《进化计算》在美国问世。1994年,IEEE神经网络委员会主持召开了第一届进化计算国际会议,以后每年举行一次。此外,此会每3年与IEEE神经网络国际会议、IEEE模糊系统国际会议在同一地点先后连续举行,共同称为IEEE计算智能(CI,Computational Intelligence)国际会议。

近年来,国际上掀起了进化计算的研究和应用热潮,各种研究结果和应用实例不断涌现。一些更新的算法相继提出,如"文化算法(CA,Cultural Algorithms)"等。将来有一天可能出现一门内容包括进化计算但比进化计算更为广泛的科学,这一科学可能被称为"自然计算(Natural Computation)"。

二、遗传进化理论的框架

在科学研究和工程技术中,许多问题最后都可以归结为(或包含了)求最优解的问题(优化问题),如最优设计问题、最优控制问题等。当进化计算用于求解优化问题时,能比较突出地体现进化计算的优点,因此我们主要以优化问题为背景介绍进化计算的基本思想和算法框架。这是目前进化计算研究和应用的重点,有时

也称为“进化优化(EO,Evolutionary Optimization)”或“模拟进化(Simulated Evolution)”。

进化计算是基于自然选择和自然遗传等生物进化机制的一种搜索算法。与普通的搜索算法(如梯度算法)一样,进化计算也是一种迭代算法,即从给定的初始解通过不断地迭代,逐步改进收敛到最优解。在进化计算中,每一次迭代被看成是一代生物个体的繁殖,因此称为“代(Generation)”。但是,进化计算与普通的搜索算法有所不同。进化计算在搜索过程中利用结构化和随机性的信息,使最满足目标的决策获得最大的生存可能,是一种概率型的算法。

首先,普通的搜索算法在搜索过程中,一般只是从一个解出发改进到另一个较好的解,再从这个改进的解出发进一步改进;而进化计算在最优解的搜索过程中,一般是从原问题的一组解出发改进到另一组较好的解,再从这组改进的解出发进一步改进。在进化计算中,每一组解称为“人口(Population)”或“解群”,而每一个解称为一个“个体(Individual)”。

其次,在普通的搜索算法中,解的表现可以采用任意的形式,一般并不需要进行特殊的处理;但在进化计算中,原问题的每一个解被看成是一个生物个体,因此一般要求用一条染色体(Chromesome)来表示,即用一组有序排列的基因(Gene)来表示。这就要求当原问题的优化模型建立之后,还必须对原问题的解(即决策变量,如优化参数等)进行编码。

此外,普通的搜索算法在搜索过程中一般都采用确定性的搜索策略,而进化计算在搜索过程中则利用结构化和随机性的信息,使最满足目标的决策获得最大的生存可能(相当于生物界的“适者生存”规划),是一种概率型的算法(Probability Algorithms)。

在自然界中,物种的性质是由染色体决定的,而染色体则是由基因有序地排列组成的。在搜索问题中,目标是由决策变量确定的,决策变量则是由一系列的分量组成。进化算法正是人为建立并充分利用了这种相似性。

一般说,进化计算的求解过程应包括以下几个步骤:

(1)给定一组初始解;

(2)评价当前这组解的性能(即对目标满足的优劣程序如何);

(3)按(2)中计算得到的解的性能,从当前这组解中选择一定数量的解作为迭代后的解的基础;

(4)对(3)所得到的解进行操作(如基因重组和突变),作为迭代后的解;

(5)若这些解已满足要求,则停止;否则,将这些迭代得到的解作为当前解,返回(2)。

三、遗传进化理论的特点

进化计算是一种具有鲁棒性(Robustness)的方法,能适应不同的环境不同的问题,而且在大多数情况下都能得到比较满意的有效解。它对问题的整个参数空间给出一种编码方案,而不是直接对问题的具体参数进行处理,不是从某个单一的初始点开始搜索而是从一组初始点搜索,搜索中用到的是目标函数值的信息,可以不必用到目标函数的导数信息或与具体问题有关的特殊知识。因而进化算法具有广泛的应用性,高度的非线性,易修改性和可并行性。

进化计算就是一种理想的鲁棒方法,它有以下几个特点:

(1)对问题的整个参数空间给出一种编码方案,而不是直接对问题的具体参数进行处理;

(2)从一组初始点开始搜索,而不是从某个单一的初始点开始搜索;

(3)搜索中用到的是目标函数值的信息,可以不必用到目标函数的导数信息或其他与具体问题有关的特殊知识;

(4)搜索中用到的是随机变换规则,而不是确定的规则。

特别引人注目的是进化算法具有以下一些优点:

(1)应用的广泛性:易于写出一个通用算法,以求解许多不同的优化问题。

(2)非线性性:现行的大多数优化算法都是基于线性性、凸性、可微性等,但进化算法可不必有这些假定,它只需要评价目标值的优劣,具有高度的非线性性。

(3)易修改性:即使对原问题进行很小的修改,现行的大多数优化算法也可能完全不能使用,而进化算法只需作很小的修改就可适应新的问题。

(4)可并行性:进化算法非常适合于并行计算。

四、遗传进化理论的分类

进化计算的各种具体实现方法是相对独立提出的,相互之间有一定的区别。从历史上看,进化计算主要是以下面三种形式出现的:遗传算法、进化规划和进化策略。进化规划和进化策略在许多实施细节上具有相似之处,有时把二者认为是同一类方法。分类系统实际上是利用遗传算法进行学习和分类(如故障的实时诊断和系统的实时监控等)的一种方法;遗传规划则可认为是采用动态的树结构对计算机程序进行编码的一种遗传算法。进化计算的分类如图4.1。①

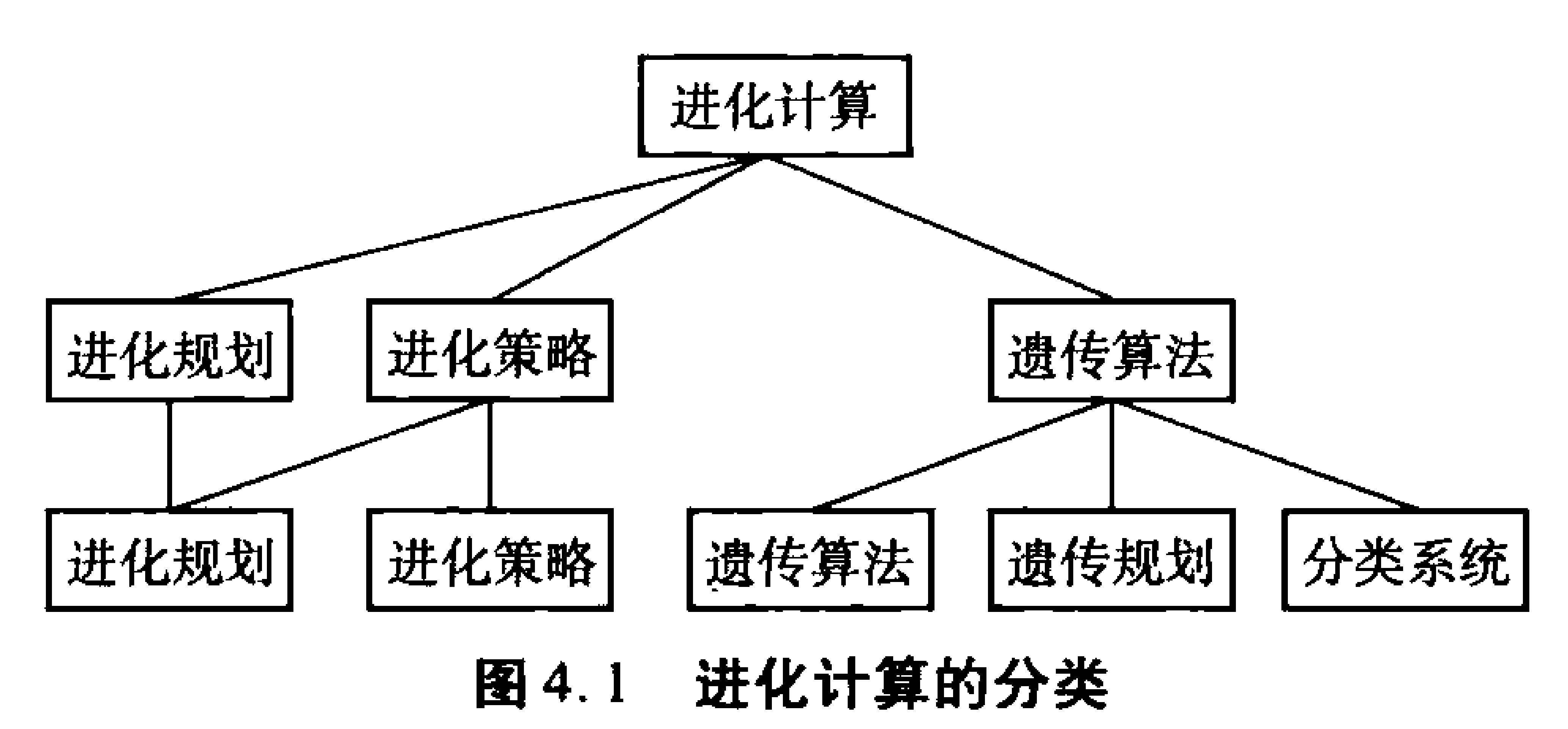


图4.1 进化计算的分类

五、遗传进化理论的研究现状

有关进化计算的理论研究成果目前还不是很多,尤其是进化规划和进化策略几乎没有什么理论基础,这在一定程度上制约了进化计算的实际应用。由于霍兰及其同事的长期努力,在遗传算法的数学基础方面做了许多工作,如提出了"模式定理",证明了一些遗传算法的收敛性等,因此遗传算法的理论研究成果相对成熟些。建立进化计算的数学模型,奠定进化计算的理论基础,更深刻

①谢金星.进化计算简要综述[J].控制与决策,1997(1):1-7.

地认识进化计算的本质,是目前有关进化计算研究的一个热点和难点。

目前,有关进化计算的理论基础主要研究以下一些问题:

(1)进化计算的数学模型和理论基础,如算法的复杂性分析、算法的收敛性和收敛速度等。

(2)研究特别适合采用遗传进化方法求解的问题类型,以及采用遗传进化方法求解效果不太明显的问题类型。

(3)从理论上和实际计算效果两方面比较遗传进化方法与其他优化方法的计算效果。

(4)遗传进化方法与其他优化方法的结合,提出新的混合算法。

(5)探索在非优化类问题中如何使用遗传进化方法。

(6)从生物进化或自然界的各种现象中获得新的启发,提出新的方法,或对现有的遗传进化方法进行改进。

(7)遗传进化方法在计算机上的有效实施方案,如进化计算的并行算法等。

第二节 遗传算法的基本理论

由上节历史的回顾中我们知道,遗传算法是20世纪60年代后期由美国霍兰(J. H. Holland)教授首先提出的一种进化算法,目前使用最为广泛,也更为成熟,因此以下我们将根据有关文献,只介绍遗传算法理论的有关要点。①

一、遗传算法的基本原理

地球上的生物,都是经过长期进化而形成的。根据达尔文的自然选择学说,地球上的生物具有很强的繁殖能力。在繁殖过程中,大多数生物通过遗传,使物种保持相似的后代;部分生物由于

①薛惠锋. 复杂性人工生命研究方法导论[M]. 北京:国防工业出版社,2007:51-71. 我们主要根据薛惠锋主编的《复杂性人工生命研究方法导论》一书对遗传算法的介绍为主,结合其他遗传算法的有关文献对遗传算法的理论要点进行介绍,特此说明并致谢。

变异，后代具有明显差别，甚至形成新物种。由于生物不断繁殖后代，生物数目大量增加，而自然界中生物赖以生存的资源却是有限的。因此，为了生存，生物就需要竞争。生物在生存竞争中，根据对环境的适应能力，适者生存，不适者消亡。自然界中的生物，就是根据这种优胜劣汰的原则，不断地进行进化。

遗传算法所借鉴的生物学基础就是生物的遗传和进化。遗传算法是模拟自然界生物进化过程与机制求解极值问题的一类自组织、自适应人工智能技术。它模拟达尔文的进化论和孟德尔的遗传变异理论，从某种程度上说遗传算法是对生物进化过程进行的数学方式仿真。它是一种建立在生物遗传理论自然选择基础上的自适应概率性迭代搜索算法，也是一种更为宏观意义下的仿生算法，模拟的机制是一切生命与智能的产生与进化过程。它通过模拟达尔文"优胜劣汰，适者生存"的原理激励好的结构；模拟遗传变异理论在迭代过程中保持已有的结构，同时寻找更好的结构。它的本质是一种求解问题的并行全局搜索方法，它能够在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识，并自适应地控制搜索过程以求得最优解。

生物的进化是以集团的形式共同进行的，这样的一个团体称为群体(Population)，或称为种群。组成群体的单个生物称为个体(Individual)，每一个个体对其生存环境都有不同的适应能力，这种适应能力称为个体的适应度(Fitness)。

虽然人们还未完全揭开遗传与进化的奥秘，既没有完全掌握其机制、也不完全清楚染色体编码和译码过程的细节，更不完全了解其控制方式，但遗传与进化的以下几个特点却为人们所共识：

(1)生物的所有遗传信息都包含在其染色体中，染色体决定了生物的性状；

(2)染色体是由基因及其有规律的排列所构成的，遗传和进化过程发生在染色体上；

(3)生物的繁殖过程是由其基因的复制过程来完成的；

(4)通过同源染色体之间的交叉或染色体的变异会产生新的物种，使生物呈现新的性状；

(5)对环境适应性好的基因或染色体经常比适应性差的基因

或染色体有更多的机会遗传到下一代。

生物遗传物质的主要载体是染色体，DNA 是其中最主要的遗传物质，而基因又是控制生物性状的功能和结构单位。偶数个基因组成染色体，染色体中的基因位置称作基因座，而基因所取的值又叫做等位基因。基因和基因座决定了染色体的特征，也就决定了生物个体的性状。此外，染色体有两种相应的表示模式，即基因型和表型。所谓表型是指生物个体所表现出来的性状，而基因型指与表型密切相关的基因组成。同一种基因型的生物个体在不同的环境条件下，可以有不同的表型，因此表型是基因型与环境条件相互作用的结果。

在遗传算法中，染色体对应的是数据或数组，在标准遗传算法中，通常是由一维的串结构数据来表现的。串上的各个位置对应上述的基因座，而各个位置上所取的值对应上述的等位基因。遗传算法处理的是染色体，或叫基因型个体。一定数量的个体组成了群体，也叫集团。群体中个体的数目称为群体的大小，也叫群体规模。而各个体对环境的适应程度叫做适应度。此外，遗传算法的执行包含两个必需的数据转换操作，一个是表型到基因型的转换，另一个是基因型到表型的转换。前者是把搜索空间中的参数或解转换成遗传空间中的染色体或个体，此过程又叫做编码操作；后者是前者的一个相反操作，叫做译码操作。

每个染色体可以看作搜索空间中的一个点，代表了一个候选解。遗传算法对染色体群进行处理，不断地用一个新的染色体群替换原来的染色体群，也就是不断地尝试新的候选解。为检验候选解的可行性，需要一个适应度函数来检查每一个候选解的适应性。这个函数给出每一个候选解的适应性的度量，也就是这个候选解对于所给定问题的有效性的度量。

与自然界相似，遗传算法对求解问题的本身一无所知，它所需要的仅是对算法所产生的每个染色体进行评价，并基于适应值来选择染色体，使适应性好的染色体有更多的繁殖机会。在遗传算法中，通过随机方式产生若干个所求解问题的数字编码，即染色体，形成初始群体；通过适应度函数给每个个体一个数值评价，淘汰低适应度的个体，选择高适应度的个体参加遗传操作，经过遗传

操作后的个体集合形成下一代新的种群，对这个新种群进行下一轮进化。

在遗传算法的运行过程中，它不是对所求解问题的实际决策变量直接进行操作，而是对表示可行解的个体编码施加选择、交叉、变异等遗传运算，通过这种遗传操作来达到优化的目的，这是遗传算法的特点之一。

遗传算法的基本原理可以用图 4.2 所示。① 首先，根据问题的初始解集把问题编码为染色体。遗传算法的工作对象是字符串，因此编码是一项基础性工作。从生物学角度看，编码相当于选择遗传物质，每个字符串对应一个染色体。遗传算法大多采用二进制 0/1 字符编码。其次，随机地建立由字符串组成的初始群体作为遗传算法进化的种群。初始群体是遗传算法搜索寻优的出发点，群体规模越大，搜索的范围越广，但是每代的遗传操作时间越长。反之，群体规模越小，每代的运算时间越短，然而搜索空间也越小。然后，计算各个个体（染色体）的适应度。适应度是衡量个体优劣的标志，它是执行遗传算法"优胜劣汰"的依据。因此，适应度也是驱使遗传算法向前发展的动力。遗传算法根据遗传概率，利用复制、交叉、变异等操作产生新个体。

二、遗传算法的基本步骤

生物的进化是以集团为主体的。与此相对应，遗传算法的运算对象是由 M 个个体所组成的集合，称为群体（或称种群）。与生物一代一代的自然进化过程相类似，遗传算法的运算过程也是一个反复迭代过程：第 t 代群体记做 $P(t)$，经过一代遗传和进化后，得到 $t+1$ 代群体，记做 $P(t+1)$，这个群体不断地经过遗传和进化操作，并且每次都按照优胜劣汰的规则将适应度较高的个体更多地遗传到下一代，这样最终在群体中将会得到一个优良的个体 X，它所对应的表现型 X 将达到或接近于问题的最优解 X。下面根据遗传算法的原理图（图 4.2）来简要介绍每一步骤的简要内容。

①薛惠锋. 复杂性人工生命研究方法导论[M]. 北京：国防工业出版社，2007：53.

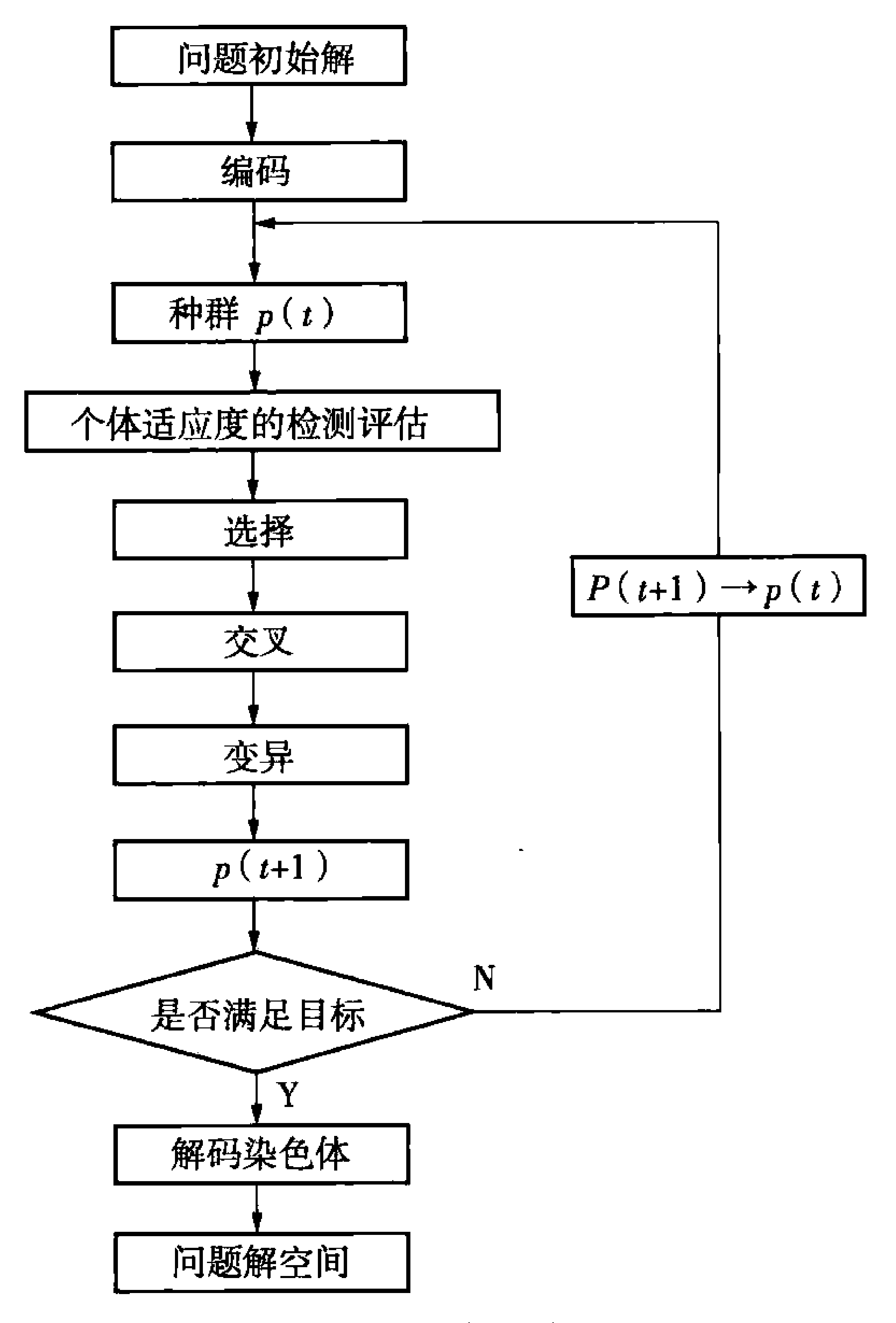


图 4.2 遗传算法基本原理

(一)编码

在遗传算法中如何描述问题的可行解,即把一个问题的可行解从其解空间转换到遗传算法所能处理的搜索空间的转换方法就称为编码。基本遗传算法使用固定长度的二进制符号串来表示群体中的个体,其等位基因是由二值符号集{0,1}所组成的。初始群体中的各个个体的基因值可用均匀分布的随机数来生成。

(二)群体初始化

群体初始化是指产生第一代一定数量的个体。一般可先将优化问题的初始解转化为个体,第一代群体中的其余个体随机产生。在应用遗传算法进行优化设计之前,要对一定的群体规模的个体进行初始化,这些经过初始化后的个体将作为遗传算法的祖先(下

一代的父代)。作为祖先的初始群体,这些给定数量的个体是通过随机方法生成的,以保证搜索空间中的每个可能解在初始群体中有相同的出现机会。

根据生物进化的过程,遗传算法的群体规模通常是确定的,在算法的第一步,确定群体规模,一般来讲,初始群体的设定可采取以下策略:根据问题的固有知识,设法把握最优解所占空间在整个问题空间中的分布范围,然后在此分布范围内设定初始群体。随机生成一定数目的个体,从中选取最好的个体加到初始群体中。这种过程不断迭代,直到初始群体中个数达到了预先确定的规模。

(三)计算适应度

在遗传算法中,适应度是描述个体性能的主要指标。根据适应度的大小,对个体进行优胜劣汰。适应度是驱动遗传算法的动力,适应度在遗传过程中具有重要意义。遗传算法的一个特点就是它仅使用所求问题的目标函数值就可得到下一步的有关搜索信息。而对目标函数值的使用是通过评价个体的适应度来体现的。将目标函数转换成适应度函数一般应遵循两个原则:①适应度必须非负;②优化过程中目标函数的变化方向应与群体进化过程中适应度函数变化方向一致。

(四)适应度函数的设定

适应度的确定和计算是遗传算法中的重要问题,由于遗传算法只依靠适应度指导搜索过程,因此它的好坏直接影响遗传算法的有效性。遗传算法对适应度函数的要求较小,只要求非负性。对函数优化问题,可以直接将目标函数定义为适应度评价函数,或通过简单地转换定义适应度函数。通常将函数优化中的目标函数映射成求最大值形式且值非负的函数。适应度函数设计主要是满足以下条件:①单值、连续、非负、最大化,②合理、一致性,③计算量小,④通用性强。

(五)复制、交换、突变、终止

遗传算法是一种群体型操作,该操作以群体中的所有个体为

对象。最简单的遗传算法中包括三种遗传操作:复制、交换和突变。

1. 复制(Reproduction)

复制是将亲代的个体原封不动地传递到子代。每代中的每一个个体,按照其适应度函数的大小决定它能够复制到下一代的概率。通过复制,使得群体中的优秀个体数目不断增加,整个进化过程朝着更优解的方向进行,反映了"优胜劣汰"的原则。

2. 交换(Crossover)

复制虽然可以使可行解群体朝着最优解方向移动,但只能在现有群体内寻优,它不能产生与亲代不同的个体。在遗传算法中引入交换算子,每一代的各个个体之间按一定的概率交换其部分基因,产生新的基因组合,使各个解有机会交流其优秀基因,可望获得比亲代更好的解的结构。执行交换的个体是随机选择的。

3. 突变(Mutation)

复制和交换只能在现有的基因型的排列组合内寻找最优,而不能产生新的基因型。突变算子是对每个字符串的每一位按一定的概率由 1 变 0 或由 0 变 1,产生新的基因型,扩大寻优范围。突变个体的选择以及突变位置的确定,都是采用随机的方法产生。

4. 终止

遗传算法是一种反复迭代的搜索方法,它通过多次进化逐渐逼近最优解而不是恰好等于最优解,因此需要确定其终止条件。最常用的终止方法是规定遗传的代次。当目标函数是方差这一类有最优目标值的问题时,可采用控制偏差的方法实现终止。一旦遗传算法得出的目标函数值与实际目标函数值之差小于允许值后,算法终止。终止条件也可通过检查适应度的变化来实现。如果群体平均适应度变化率和最优个体适应度变化率小于许可精度,则可以认为群体处于稳定状态,群体进化基本收敛,可结束群体进化过程,否则继续群体的进化过程。

在遗传算法的初期，最优个体的适应度以及群体的平均适应度都较小，以后随着复制、交换、突变等操作，适应度值增加。到了遗传算法后期，这种增加已趋缓和或停止，一旦这种增加停止，即终止遗传算法。

三、遗传算法的模式定理

在霍兰等学者的努力下，遗传算法在基础理论方面有了比较扎实的基础①，这是它有别于进化规划和进化策略两种进化计算理论的地方。正是有了这些基本定理，遗传算法的学科建构才算基本完成，并在其他学科中广泛应用开来，也为我们提炼遗传进化方法提供了比较扎实的理论平台。

（一）模式

种群中的个体即基因串中的相似样板称为"模式（Schema）"，模式表示基因串中某些特征位相同的结构，因此模式也可以解释为相同的构形。它描述的是一个串的子集，在二进制编码的串中，模式是基于三个字符集（0，1，*）的字符串，符号 * 代表任意字符，即 0 或 1。

在引入模式概念之后，遗传算法的本质是对模式所进行的一系列运算，即通过选择算子将当前群体中的优良模式遗传到下一代群体中，通过交叉算子进行模式的重组，通过变异算子进行模式的突变。通过这些遗传运算，一些较差的模式逐步被淘汰，而一些较好的模式逐步被遗传和进化，最终就可得到问题的最优解。

为定量地估计模式运算，需要再引入两个概念：模式阶和模式定义长度。

1. 模式阶

在模式 H 中具有确定基因值的位置数目称为该模式的模式阶（Schema Order），记为 $O(H)$。

---

①薛惠锋. 复杂性人工生命研究方法导论[M]. 北京：国防工业出版社，2007：55-60.

对于二进制编码字符串而言，模式阶就是模式中所含有的 1 和 0 的数目。模式阶用来反映不同模式间确定性的差异，当字符串的长度固定时，模式阶数越高，能与该模式匹配的字符串（称为样本）数就越少，因而该模式的确定性也就越高。

2. 模式定义长度

模式 H 中第一个确定基因值的位置和最后一个确定基因值的位置之间的距离称为该模式的模式定义长度（Schema Defining Length），记为 $\delta(H)$。

例如：$\delta(1\ 1\ *\ 0\ *\ *\ *)=3$，$\delta(0\ 1\ 1\ *\ 1\ *)=4$。而对于 $H=*\ *\ *\ *\ 1$，$H=0\ *\ *\ *\ *\ *$，$H=*\ *\ *\ *\ 1\ *\ *$ 之类的模式，由于它们只有一位确定的基因值，这个位置既是第一个确定基因值位置，也是最后一个确定基因值位置，所以规定它们的模式定义长度为 1。

在遗传操作中，即使阶数相同的模式，也会有不同的性质，而模式定义长度就反映了这种性质的差异。

从前面的叙述我们可以知道，在引入模式的概念之后，遗传算法的实质可看作是对模式的一种运算。对基本遗传算法而言，也就是某一模式的各个样本经过选择运算、交叉运算、变异运算之后，得到一些新的样本和新的模式。

（二）模式定理

模式定理（Schema Theorem）：在选择算子的作用下，对于平均适应度高于群体平均适应度的模式，其样本数将呈指数级增长；而对于平均适应度低于群体平均适应度的模式，其样本数将呈指数级减少。

模式定理深刻地阐明了遗传算法中发生“优胜劣汰”的原因，在遗传过程中能存活的模式都是定义长度短、阶次低、平均适应度高于群体平均适应度的优良模式。遗传算法正是利用这些优良模式逐步进化得到最优解。它保证了遗传优化过程中较优解的样本数呈指数级增长，从而给出了遗传算法的理论基础。霍兰指出，遗传算法是一个寻找可行解的可实现的优化过程。

霍兰的模式定理认为,低阶、定义长度短的模式在群体中指数增加。他预言在群体大小为 N 的字符串中,处理的模式数目为 $O(n^3)$。这说明了遗传算法的处理能力与传统优化方法相比而具有的卓越优点,是遗传算法具有独特魅力的主要原因。因此,遗传算法也称为隐式并行算法(Implicit Parallelism)。

应该注意的是,虽然模式定理在一定意义上可以解释遗传算法的优化本质,但它仍具有很大的局限性,这主要表现在以下两方面:①模式定理只适用于基于二进制编码的遗传算法;②由模式定理无法推断算法的收敛性。

(三)积木假说

模式定理说明了具有某种结构特征的模式在遗传进化过程中其样本数将按指数级增长,这种模式就是具有低阶、短的定义长度、平均适应度高于群体平均适应度的模式。这种类型的模式被称为基因块或积木块(Building Block)。之所以称之为积木块,是由于遗传算法的求解过程并不是在搜索空间中逐一地测试各个基因的枚举组合,而是通过一些较好的模式,像搭积木一样,将它们拼接在一起,从而逐渐地构造出适应度越来越高的个体编码串。

积木假设(Building Block hypothesis):遗传算法通过短定义距、低阶以及高平均适应度的模式(积木块),在遗传操作作用下相互结合,最终接近全局最优解。满足这个假设的条件比较简单,包括两个方面:①表现型相近的个体,其基因型类似;②遗传因子间相关性低。

模式定理说明了积木块的样本数呈指数级增长,即说明了用遗传算法寻求最优样本的可能性,但它并未指明遗传算法一定能够寻求到最优样本,而积木块假设却说明了遗传算法的这种能力。

目前大量的实践支持积木假设,它在许多领域内都取得成功,模式定理保证了较优模式(遗传算法的较优解)的样本数呈指数增长,从而满足了求最优解的必要条件,即遗传算法存在找到全局最优解的可能性。而积木假设说明了用遗传算法求解各类问题的基本思想,即通过基因块之间的相互拼接能够产生出问题更好的解。基于模式定理和积木假设,就使得我们能够在很多应用问题中广

泛地使用遗传算法的思想。

(四)收敛性

算法的收敛性是衡量算法性能的重要指标之一。一个算法是收敛的,是指算法产生了一个解或函数值的数列,全局最优解是该数列的极限值。基本遗传算法的选择、交叉和变异操作都是独立随机进行的,新群体仅与其父代群体及遗传操作算子有关,而与其父代群体之前的各代群体无关,即群体无后效性,并且各代群体之间的转换概率与时间的起点无关。

四、遗传算法的实现过程

遗传算法是一种群体型操作,该操作以群体中的所有个体为对象,它要通过一系列的实施过程等流程来能实现遗传算法的有关算法计算。①

假设给定了一个问题,并且用定义好的长度为 m 的染色体串代表候选解,大致流程可以叙述为:

(1)随机生成 n 个长度为 m 的染色体串,形成初始的染色体群。

(2)将染色体群中每个染色体串代入适应度函数,计算适应度函数。

(3)判断是否满足终止条件,若是,则适应度值最大的染色体对应的候选解就是需要的满意解;若否,则转步骤(4)。

(4)重复下列步骤直至产生了 n 个后代。

①在当前的染色体群中随机选取两个染色体作为父体,选取染色体的概率函数应该是适应度的增函数。在选取父体的过程中,一个染色体可以被多次选中。

②对于选中的父体,按照概率 p_c(称为交叉概率)决定是否交叉产生两个新的后代,发生交叉的位置是随机的,每个位置的概率是相同的。如果不发生交叉,则两个后代是对两个选中的父体进

①薛惠锋.复杂性人工生命研究方法导论[M].北京:国防工业出版社,2007:51-71.

行严格复制的结果，注意这里定义的交叉是两个父体在一个随机的位置上进行交叉。在遗传算法中有时会用到多点的交叉，即在多个随机的点上发生交叉。

③对于产生的两个后代，分别在每个位置上按照概率 p_m（变异概率）发生突变。将两个后代放入新的染色体群。

④如果 n 是奇数，可以随机地放弃一个新的后代。

(5)生成 n 个新的染色体后，用新的染色体群代替原来的染色体群。

(6)转向步骤(2)。

每次迭代的这一过程称为一个世代。一个遗传算法的应用通常需要迭代 50 ~ 500 个世代，可以指定迭代的世代数作为算法的终止条件。

这里只是列举了一些基本实施流程，具体实施的技术步骤请参看遗传算法相关的文献。①

第三节　复杂系统的遗传进化方法

组织生长和进化一直是科学和哲学共同关心的问题。一切存在物都是经过长期演化发展的结果，一个组织系统一旦涌现生成，必然将进入生长、进化阶段。自从达尔文的进化论提出以来，经过生物学的遗传理论发展，进化发展问题成为科学研究的一个重要领域。进化论和遗传学也为哲学的进化发展问题提供了坚实的科学依据。许多学者从科学方法论对组织发展进化机制问题进行了探索，但问题依然隐藏在黑暗之中。复杂性科学的遗传进化理论以生物进化为依据，以计算机为技术手段，通过选择、交换、变异等基本算法来解决复杂组织的计划、发展的机理问题，为我们探索组织的发育、发展、进化问题提供了新的科学依据和视野。

---

①王小平，曹立明．遗传算法——理论、应用与软件实现[M]．西安：西安交通大学出版社，2004.

一、遗传算法:组织生长的科学刻画

大千世界,草长虫鸣,万物竞芳,百花争艳,于是人们对万物的生长产生了浓厚的兴趣,希望能够揭开其生长的秘密。宗教、哲学和科学都对组织的生长问题表示出极大的关注。古希腊的哲学家和科学家,特别是亚里士多德从生物学和哲学两个层面对生长问题进行过科学和哲学的探索,并提出了整体大于部分之和的著名结论。西方文艺复兴以后,近代科学主要被以牛顿力学为代表的机械自然观所笼罩。对待有机世界,也基本上用孤立、静止、分析的还原方法进行观察、研究,他们把生机勃勃的有机世界变成了一个了无生机的机械世界,自然也就没有演化生长的问题,于是拉·梅特里得出了"人是机器"的结论。

达尔文进化论的提出是一场科学革命,是一种世界观的变革。它确立了一种普遍联系、生成演化的科学观,彻底抛弃了基督教关于"上帝造物"的神圣信念,抛弃了构成论和机械自然观,带来了崭新的生成论和有机自然观,恢复了大自然的演化性和复杂性,并按照大自然的本来面目去理解自然。在达尔文看来,大自然不是一成不变的,而是在不断地生成、演化和发展之中,由此解开了大自然进化、发展的宏观机制。随后,孟德尔的生物遗传学说更揭开了生物世界的遗传、进化的微观秘密。

达尔文进化论在社会中形成了巨大的反响,并越出生物学界,变成了新的世界观,哲学观念也随之发生了变革。首先是马克思主义哲学提出了唯物辩证法及其发展观。唯物辩证法认为,世界是普遍联系、永恒发展的,发展的本质是新事物代替旧事物,也就是新陈代谢,并遵循对立统一、质量互变和否定之否定等三大规律来发展变化。后来,有人将进化论用于各个领域,形成了社会达尔文主义等各种流派。

一个组织系统的完整生命周期是孕育、涌现、生长、完善、老化、衰亡等几个不同阶段。由混沌无序的一些基本构件经过受限生成过程,涌现生成为一个有序的组织系统,于是组织系统由此完成了诞生阶段。通过复杂的适应机制,诞生之后的组织系统能够保持着组织的稳定和存在。然而,要完成整个生命周期,组织还要

向前发展,经过生长阶段才能发展壮大。在这个阶段里,组织系统能够迅速发展,经历一个加速、前进的过程。

组织一旦涌现生成之后,一般都会进入生长阶段。例如,细胞长大并产生分化,生物从受精卵变为胚胎、又从胚胎发育成复杂的有机体,社会组织、经济组织也会从简单到复杂等等。生长不仅意味着组织系统量的变化,更重要的是内部子系统增多,关系日益复杂,组织规模不断扩大,各种功能日益复杂和完善,这些都是质的变化。① 为什么有的组织会生长?为什么生长总是意味着从简单到复杂?这是一个既迷人又难于回答的问题。进化论虽然已经创立一百多年,而且产生了巨大的影响,但是它并没有解决组织生长的问题。正如诺贝尔奖获得者埃德曼(G. M. Edeman)所说:"现在已有了适当的遗传学和进化论,但是至今没有适当的发育理论。"②也就是说,达尔文的进化论以及孟德尔的遗传学虽然影响巨大,然而这些理论并没有揭开组织生长的奥秘,组织生长问题依然笼罩在神秘的阴影之中。

其实组织的生长发育和进化机制是完全不同的,进化论和当代的耗散结构理论、复杂性理论中的涌现理论已经提供了组织起源的机制,但仍然解释不了生长发育现象。在组织起源和进化过程中,从非组织状态到组织状态是一个准随机过程,但组织生长发育却不是随机过程,当生长条件具备时,它是一个确定的过程。具体说来,涌现生成是组织从无序到有序的过程,其组织状态是一个从不确定到确定的过程;而生长演化是从有序到另一个有序的过程,其组织状态是从确定到一个新的确定过程。"从系统内部来看,指系统结构方式的根本变化,从一种结构变为另一种性质不同的结构;从系统外部整体来看,指系统整体形态和行为方式的根本变化,从一种形态变为另一种性质不同的形态,或从一种行为模式变为另一种性质不同的模式。"③因此,"仅仅了解进化和组织的起源,只解决了问题的一半,生长、发育是有组织的整体演变方式的

①②金观涛. 整体的哲学[M]. 成都:四川人民出版社,1987:132.

③苗东升. 系统科学精要[M]. 北京:中国人民大学出版社,2006:42.

重要部分。"①

金观涛在其《整体的哲学》中从其功能耦合理论出发，试图揭开组织生长的机制，为我们解释组织的生长发育提供了一个全新的视角和方法。他认为，组织生长是一个功能耦合网自动扩张的过程："内稳态→新的功能耦合网→新的内稳态→进一步建立功能耦合网……"②"组织生长第一步是从原来功能耦合网的稳态开始的，这个稳态可以引发一个过程。当有某种基础的维生结构的稳态可以引发一个过程，而这个过程又刚好能形成一个新的功能耦合网时，那么新形成的功能耦合网就可以形成新的内稳态。……如果这些新的稳态又能引发新的功能耦合网，那么这个过程就自动进行下去。作为维生结构的功能耦合网越来越大，这就是生长。"③金观涛意识到了组织生长问题的重要性，并提出了一套解释体系。但是他对内稳态和功能耦合网的交互发展的机制解释并没有真正揭示出组织生长的微观机制。可以说，他构造的是功能解释，而不是机制解释。

美国学者霍兰将达尔文的进化理论和孟德尔的遗传理论结合起来，并运用计算机作为计算工具，构造了一种揭示组织生长机制的算法理论，这就是著名的遗传算法理论。遗传算法是一种模拟生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法，其主要特点是群体搜索策略和群体中个体之间的信息交换。遗传算法的实现机制是，在给定初始群体和遗传操作的前提下，通过反复迭代来实现群体的进化。

遗传算法是一种由一个"染色体群"通过"自然选择"的机制转化成另一个"染色体群"的方法。这里的"自然选择"通过遗传学中"选择""交换"和"突变"三种操作来共同实现。选择操作主要是从染色体群中选出可以繁殖后代的染色体；交换操作用于交换两个染色体组成部分，实际上是模仿两个单倍体的再结合；突变操作

①金观涛. 整体的哲学[M]. 成都：四川人民出版社，1987：132.

②金观涛. 整体的哲学[M]. 成都：四川人民出版社，1987：143.

③金观涛. 整体的哲学[M]. 成都：四川人民出版社，1987：144.

主要是随机地改变染色体上某一位置的遗传因子的数值。① 遗传算法的目的，一是想抽取和解释自然系统的自适应过程，二是设计具有自然系统机理的人工系统。不过，如果把遗传算法放在复杂性科学体系中去考察，我们就会发现，遗传算法其实是在遗传继承的基础上通过交换、突变等机制，科学地刻画了组织的生长和演化。也即是说，遗传算法是解释组织生长、进化的科学工具。它通过选择、交换、突变等手段，刻画了一个组织从简单到复杂、从幼小到成熟，不断成长、不断发展的微观生长过程。从科学方法论角度来看，遗传算法已经超越了具体学科的界限，成为一套刻画组织生长的科学方法。也就是说，它已经从一门复杂性科学分支走向了一套新的刻画组织生长的科学方法。

二、遗传复制：组织传承的微观过程

我们说过，生长、发展是一个从确定到确定的过程，也就是说，任何生长、发展或创新，都不可能凭空产生，都需要一个基础或平台，我们人类的认识也是在继承中发展。在继承、发展的过程中，过去的经验起了特别重要的作用。遗传算法中的遗传复制就是承认创新、生长的基础和平台，也就是承认经验在创新中的地位。组织生长是从一个确定的内稳态开始，不断扩张和发展。这个扩张的过程是怎样进行的呢？我们从遗传算法的遗传复制机制说起。

世间的生物从其父代继承特性或性状，这种生命现象就称为遗传（Heredity），由于遗传的作用，使得人们可以种瓜得瓜、种豆得豆，也使得鸟仍然是在天空中飞翔，鱼仍然是在水中邀游。生物的主要遗传方式是复制。遗传过程中，父代的遗传物质 DNA 被复制到子代。即细胞在分裂时，遗传物质 DNA 通过复制（Reproduction）而转移到新生的细胞中，新细胞就继承了旧细胞的基因。

遗传算法的第一个算法操作是遗传复制，它能够把优良的基因放大、传递下去。遗传算法中的选择操作用来确定如何从父代群体中按某种方法选取哪些个体遗传到下一代群体中的一种遗传运算。选择操作建立在对个体的适应度进行评价的基础上。最常

①许国志. 系统科学[M]. 上海：上海科技教育出版社，2000：131.

用的选择算子是基本遗传算法中的比例选择算子。

遗传算法中的遗传复制究竟怎么样展开呢？也就是说是怎么来遗传复制呢？遗传算法将个体进行编码后，计算出其适应度，适应度高的个体被遗传、复制到下一代的可能性就更大，被遗传、复制的可能性与其适应度成正相关。这也就是说，优秀的种子更有机会当做父代被大量复制、传播和扩散，成为生长、发展的良好基础。达尔文的进化论的优胜劣汰原则在这里真正得到了很好的体现。完全的遗传复制，是原原本本的克隆，龙生龙，凤生凤，如果没有选择而任由其繁殖，那么优胜劣汰就难于完成，只有按照适应度来选择父代，后代才能不断地更加优秀，在这里强化了优秀种子的重要性。

在组织的发展过程中，大部分的工作就是复制，甚至是大量的复制。一种先进的组织形式能够在全世界被广泛复制，一种先进的产品能够在全球生产和消费，这其实就体现了这种遗传复制的广泛性。例如麦当劳、肯德基快餐，是一种先进的饮食文化形式，受到了全世界年轻人的普遍欢迎，于是麦当劳、肯德基在全世界的许多地方大量复制，而且是按照统一的标准和模式，完全克隆，并且基本上都获得了很大的成功。在某个地方比较成功的商业经验或模式，往往被人在其他不同的地方模仿或复制。例如美国的沃尔玛超市管理模式如今在中国各城市得到大力发展，虽然不一定是沃尔玛公司开设的分店，但其他企业都模仿、复制了其百货超市的管理模式，而且大部分都得到了巨大的成功。许多人异地复制、移植他人的成功经验或模式，这其实都是遗传复制机理在商业管理模式上的成功应用。

在技术的传承、发展过程中，复制也是十分重要的环节。技术发展史表明，在人类的技术发展过程中，真正的发明创造数量毕竟是有限的，而发生技术革命的阶段更是屈指可数，其大部分阶段都是在复制、应用那些比较先进的技术。齐曼在《技术创新进化论》中详细论述了继承在技术创新和进化中的作用。人们根据其时代的技术阶段和水平，传播、复制、应用那些在当时来说处于先进水平的技术。

人类文明在其漫长的发展过程中，继承、复制也是占据了大部

分时间。我们的教育就是从继承、复制开始的。人从一出生就开始学习、继承和复制，从咿呀学语起步，经过幼儿园、小学、初中、高中和大学等漫长的二十多年的时间，我们都在学习前人创造的知识。在这个学习阶段，特别强调原原本本的集成和复制，例如老师会要求我们大量背诵名篇名句，掌握公式、定理、定律，我们往往以能够熟读唐诗三百首为骄傲。其实学生阶段的主要工作就是在学习和继承前人的知识。所谓学习，就是通过不断反复而继承前人所创造的知识。从幼儿园到高中毕业，学习、继承的主要是一些最基本的知识和技能，而在大学阶段则开始学习、继承一些更加专门的知识和技能。

我们可以说，继承、遗传、复制是创新发展的基础和平台，创新、发展是在学习、继承的基础上才有可能。由此可见，遗传复制是发展创新的前提和第一步。现在的问题是，我们要继承、遗传什么样的东西？经过漫长的发展阶段，人类创造了无数的文化，我们不可能继承所有的东西，所以我们提出了“吸收其精华，剔除其糟粕”的选择标准。在技术的发展过程中，也是大部分技术被历史淘汰，而只有一些优秀、先进的技术才能被继承、遗传下来。优秀的组织管理经验才能被推广、传播到世界各地，并随着时代的进步而不断被后人继承。在遗传算法中，霍兰选取适应度这么一个科学参数来刻画其优劣的程度，并且根据适应度的大小来选取父系的样本。那些适应度高的样本将有更多的机会被选取为父本，被当作遗传、复制的模板。在动物界，那些特别强壮的雄性动物拥有更多交配的机会，拥有更多的后代。育种专家也根据这个原理而选取那些具有更大适应度的动植物作为父本来进行培育更加优秀的动植物品种。在我们中小学的学习阶段，各科的教材都选取那些最优秀的前人知识，例如语文课本的文章基本都属于名篇经典。适应度正好科学地刻画了达尔文的“适者生存”的大自然法则。总之，选择优秀的父本或种子进行遗传复制其实也是一种重要的发展手段，是组织发展、生长的基础和不可或缺的机制。因此，选择优秀的种子是组织生长发展的第一步。

三、基因交换:组织生长的优势组合

遗传复制仅仅是将父系进行了原样的克隆、复制,虽然大多数时候都是选取优秀的父本进行复制,但这只是组织生长、发展的第一步,只是将优秀的父本进行了发扬光大,还没有实质性的创新。遗传算法给我们提供的第二种生长、发展机制是基因交换机制,这种机制让来自父本和母本的不同基因进行了相互的交换,优势得到了互补,因此形成了杂交优势。

在生物的遗传方式中,所谓基因交换是指有性生殖生物在繁殖下一代时,两个同源染色体之间通过交叉(Crossover)而重组,亦即在两个染色体的某一相同位置处 DNA 被切断,其前后两串分别交叉组合而形成两个新的染色体。在遗传学中,通过交换的相互作用会引起父母的特性在后代身上的重新组合。霍兰的遗传算法模仿生物的基因交换,通过交叉,子代的基因值不同于父代。

在生物的自然进化过程中,两个同源染色体通过交配而重组,形成新的染色体,从而产生出新的个体或物种。交配重组是生物遗传和进化过程中的一个主要环节。模仿这个环节,在遗传算法中也使用交叉算子来产生新的个体。遗传算法中的所谓交叉运算,是指对两个相互配对的染色体按某种方式相互交换其部分基因,从而形成两个新的个体。

交叉算子的设计和实现与所研究的问题密切相关,一般要求它既不要太多地破坏个体编码串中表示优良性状的优良模式,又要能够有效地产生出一些较好的新个体模式。另外,交叉算子的设计要和个体编码设计统一考虑。

交叉算子的设计包括以下两方面的内容:①如何确定交叉点的位置;②如何进行部分基因交换。

从交叉点的数量来分类,交叉可以分为单点交叉和多点交叉。单点交叉又称为简单交叉,它是指在个体编码串中只随机设置一个交叉点,然后在该点相互交换两个配对个体的部分染色体。单点交叉的特点是若邻接基因座之间的关系能提供较好的个体性状和较高的个体适应度的话,则这种单点交叉操作破坏这种个体性状和降低个体适应度的可能性最小。多点交叉(Multi-point

Crossover)是指在个体编码串中随机设置多个交叉点,然后进行基因交换。多点交叉又称为广义交叉。最基本和最常用的是单点交叉算子。

遗传复制只是简单地拷贝了已经存在的字符串,没有产生任何新的组合。换言之,复制没有产生任何新假设,因此主体将被限制在呈现于最初群体中的最好假设上。无论最初的群体有多大,产生新假设的可能性都微乎其微。在一个复杂的、变化多端的环境中,如果只采取选择复制的主体,不可能与能够产生新假设的主体相抗衡。这正是交换起作用的地方。交换是一种机制,是遗传算法产生新个体的主要手段。人们用它来培育杂交优势的植物和动物。也正是有了交换操作,群体的性态才多种多样。一对染色体交换其遗传物质时所发生的情形很接近于一种文字描述。在胚胎细胞形成(减数分裂)阶段,来自父母之中某一方的染色体,会与来自另一方的染色体交换,形成一种类似 X 的形状,也就是 X 的"上臂"交换了位置(图 4.3)。① 其生成的结果是与父母染色体不同的新的一对染色体。每个染色体都包含父母双方的某一个片段,从起点交换到交换点,然后转到另一半的后半段。交换在获取玉米或种马的优势品性方面是行之有效的。我们可以知道什么品性需要增强,就可以为此选择相应的父母。

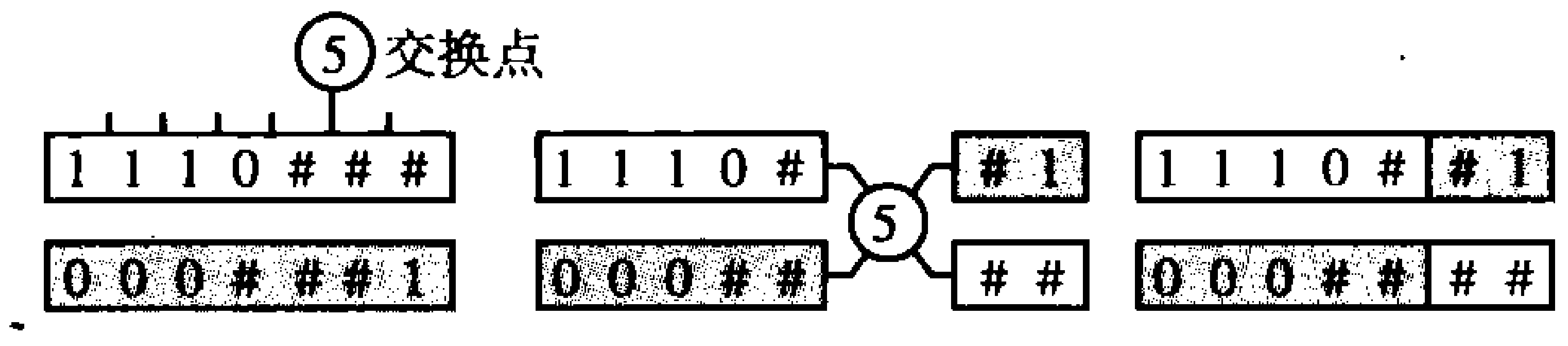


图 4.3 对染色体的交叉算法,形状类似 X

历史的回顾显示,技术创新似乎总是由于已知技术的特定组合而产生的。20 世纪为社会带来重大变革的两项技术创新,内燃机和数字计算机,也是交叉组合的结果。内燃机是由伏打(Volta)的点火装置、文丘里(Wenturi)的(香水)喷雾器、水泵的活塞、研磨机的齿轮等组成的。第一台电子数字计算机组合了盖革(Geiger)

---

①约翰·H. 霍兰. 隐秩序——适应性造就复杂性[M]. 周晓牧,韩晖,译. 上海:上海科技教育出版社,2000:66.

粒子计数器、阴极射线管图像的延迟特性(逐渐消退)、直流电线的使用等等。在这两种情况的技术积木中,多数都是在19世纪一些不同的情景中使用了的。在极多的可能性中,正是一种特定的组合带来了创新。例如,晶体管的诞生给许多装置带来了革命。即使新的积木也经常是通过组合更多的基本积木派生出来的,至少部分是这样。晶体管就是建立在人们对硅整流器和半导体的认识之上的。

复杂的模式一般由较短的、已确立的模式组合形成。较为复杂的积木通常由较为简单的积木组合而成。例如内燃机之类的创新常常把相对简单、广泛使用的积木加以特定的组合而成。而像内燃机之类的设备会进一步成为更为复杂设备的中心部件。最终的结果就是一个等级,其中,某一级的积木组合后形成下一级的积木。在遗传算法中,也形成了类似的等级,其中较为高层次(较长的)模式一般由受过检验的、高于平均数的短模式交叉组合而成。

在科学的发展过程中,学科交叉往往也是新学科或新理论产生的重要途径。例如科学哲学是科学和哲学交叉的结果。产业生态学是生态学与产业经济学相互交叉的产物。从科学的发展史看来,沿着纯粹自身的内在发展逻辑来看,学科发展的道路可能会越走越窄,特别是经过长期发展之后,往往缺乏更强大的内在动力。但如果与其他学科交叉之后,可能获得其他学科的一些新视野、新方法或新问题,例如产业生态学就是用生态学的理论和方法来对产业发展中的一些问题进行研究,它能够从生态学的新视野和新方法去发现和解决传统产业经济学无法发现和解决的一些问题。据科学研究,交叉学科是目前最有发展前途的学科领域,因为在交叉领域充分地发挥了多个学科领域的优势。

文化的发展也是这样,文化的交叉、融合、互补是文化发展的重要途径和方向。比如各国、各民族的文化都有自身优秀的文化基因,特别是西方文化、东方文化各有自身的优势,如今各种文化的交融和互补已经成为一种大趋势,成为各种文化发展的出路。任何完全漠视其他文化的文化闭关自守,最终都只能走向衰落,所以互补是所有文化的出路,差异越大的文化,其互补性越强。

四、基因变异:组织创新的内在机制

生物在进行细胞复制时,可能产生某些复制差错,这种差错虽然概率很小,但却使 DNA 发生某种变异(Mutation),产生出新的染色体,这些新的染色体表现出新的性状,这就是生物的变异。

遗传算法模仿生物的变异过程,提出了一种新的创新手段,即变异运算。变异运算是对个体的某一个或某一些基因座上的基因值按某一较小的概率进行改变,它也是产生新个体的一种操作方法。

从遗传运算过程中产生新个体的能力方面来说,交叉运算是产生新个体的主要方法,它决定了遗传算法的全局搜索能力,而变异运算只是产生新个体的辅助方法,但它也是必不可少的一个运算步骤,因为它决定了遗传算法的局部搜索能力。交叉算子与变异算子的相互配合,共同完成对搜索空间的全局搜索和局部搜索,从而使得遗传算法能够以良好的搜索性能完成最优化问题的寻优过程。

在遗传算法中使用变异算子主要有以下两个目的:改善遗传算法的局部搜索能力;维持群体的多样性,防止出现早熟现象。

变异算子的设计包括如下两方面的内容:如何确定变异点的位置;如何进行基因值替换。较常用的基本位变异和均匀变异等几种变异操作方法,它们适合于二进制编码的个体和浮点数编码的个体。

1. 基本位变异(Simple Mutation)

我们采用基本位变异的方法来进行变异运算,其具体操作过程主要有两步:一是确定出各个个体的基因变异位置;二是依照某一概率将变异点的原有基因值取反。

2. 均匀变异(Uniform Mutation)

均匀变异操作是指分别用符合某一范围内均匀分布的随机数,以某一较小的概率来替换个体编码串中各个基因座上的原有

基因值。均匀变异的具体操作过程是依次指定个体编码串中的每个基因座为变异点，并对每一个变异点，以变异概率 pm 从对应基因的取值范围内取一随机数来替代原有基因值。均匀变异操作特别适合应用于遗传算法的初期运行阶段，它使得搜索点可以在整个搜索空间内自由地移动，从而可以增加群体的多样性，使算法处理更多的模式。

突变通过偶然地把某个等位基因改变为它的一个可选项，可以重新开始搜索。突变提供了繁殖复制和交换做不到的发展和创新。在生物组织系统中，基因突变的情况比较少发生，也就是说突变的发生概率很低，大部分创新都是通过基因交换而产生的，所以霍兰说："在生物系统中，交换远比突变要频繁，通常要频繁上百万倍。"①在技术的发展过程中，大部分的技术是各种现有技术的基础上经过交叉、组合而产生的技术创新。但是也有一些技术发明创造是属于真正的原创性的发明创造，这也就是我们经常说的原创性发明。这些原创性发明创造其实与这里的变异算子在方法论上是一致的。生物组织在其发展过程中，变异的可能性虽然很小，但却是产生新物种或新组织的重要手段。在技术的发展过程中也是这样，原创性的技术发明和创新虽然比较少，但却是技术发展过程中极其重要的过程和环节。一个民族或国家对技术发展最重要的贡献是看其原创性，所以我们国家在不断鼓励原创性的技术发明和核心创新，拥有自主知识产权，掌握核心技术。

总之，组织在其发展过程中，其基本组成（染色体或基因）有可能发生一些突变行为，引起其结构或性能的变化，最后产生了新的组织形式，新事物的产生往往就是通过这种突变而产生的。

五、优胜劣汰：组织生长的科学奥秘

达尔文在其进化论中提出了优胜劣汰这个著名的生物生存法则，但他对这个法则的刻画主要还是描述性的，缺少一个系统进化

①约翰·H. 霍兰. 隐秩序——适应性造就复杂性[M]. 周晓牧，韩晖，译. 上海：上海科技教育出版社，2000：69.

的科学测度指标。霍兰的遗传算法通过其建构的适应度这个参数,科学地描述了系统的进化指标。所以适应度在遗传算法中起着极其重要的作用。

遗传算法最重要的特点是把问题转换成一个描述问题的字符串,仅仅通过作用于整体串就能够实施积木的复杂操作。一般来说,积木的数目特别巨大,以至于很难计算出其平均适应度。但是,这个平均适应度却是一个关键的参数,对增加或减少给定积木的使用起着重要的指导作用。遗传算法不要求计算平均适应度,只对整体字符串进行复制、交换和突变等三种操作,通过局部的寻优来进行优胜劣汰。一代高于平均数的模式会在下一代频繁使用,而低于平均数的模式则较少使用。通过对相对较小的字符串的显式操作,来隐式地进行大量模式的操作,这种能力在遗传算法中被称为隐式并行性(implicit parallelism)。

遗传算法通过复制、交换和突变等三个步骤相互结合,利用高于平均适应度的积木产生新一代,并由此实现组织的进化、生长和发展。在复制操作中,组织根据适应度进行繁殖,将有关模式平均数的估算作为启发式计算的论据,用以对待所有的模式:高于平均数的模式在下一代中将有较多的后代,而低于平均数的模式其后代数量则会较少。在交换操作中,交换生成的后代不同于它们的父母,产生由复制传递的模式新组合。交换会更多地使用高于平均数的短模式,但可能会打乱长模式,特别是那些不把高于平均数的短模式作为积木的长模式。当交换打乱了现存模式时,以前没有尝试过的模式可能会通过片段的重新组合而生成。也就是说,交换可以生成新的模式,即使它只是把那些已存在的模式重新组合而已。在突变操作中为等位基因的丢失提供了一个保险政策,它还能够通过改变现存模式的定义位生成新的模式。复制、交换和突然产生的后代串随机取代现存群体中的选定串,新世代就由此产生。

按照积木操作和隐式并行性来观照新规则或新组织的产生,我们会发现组织生长的奥秘。我们以人类这一生物群体为例。在给定的一代人中,没有哪一个人与前一代人的任何人是相同的。

在一代人中,即使是最杰出的一些人也不会在将来的一代中重现。从古到今,再到将来,唯有一个爱因斯坦。进化过程中,每一代都会“忘记”那些最杰出的人。但是,虽然特定的个体不会再现,不过他们的积木(优秀基因)却会不时再现出来。积木的这种重现与人工育种的功能很相似。每个育种人员都知道,某种期望的特性与特定的血缘相关。通过选择性交叉育种,有些积木可以组合起来。虽然我们不会再一次看到某一匹著名的良种马或一只良种狗,但它们的积木(基因)会一次次重现。

进化过程“记住”了提高适应度的积木组合。一代接一代重现的积木,就是那些在经受了检验的情境下生存下来的积木。一个层次上确立的积木,经过选择性组合,会成为下一个更高层次的积木,所以进化过程会在所有层次上不断地生成和选择积木。进化过程不断地创新,但在每一个层上,它保留重组过的元素,从而完成创新。当在某一层上发现了一个新积木,这通常开启了一整套可能性,因为它与其他现存的积木可能形成新组合。大量的变化和进步就是通过选择、交叉、突变而接踵而至,遗传算法用极其简单的科学手段模拟了这个组织生长、创新和发展的过程。

第四节 遗传进化方法的应用现状

遗传进化方法几乎在所有的科学和工程问题中都具有应用前景,有关其应用效果的报告不胜枚举。一些典型的应用领域如下①:

(1)复杂的非线性最优化问题:对具有多个局部极值的非线性最优化问题,普通的优化方法一般难以找到全局最优解;而遗传进化方法可克服这一缺点,找到全局最优解。

(2)复杂的组合规划或整数规划问题:大多数组合规划或整数规划问题都难以找到有效的求解方法,而遗传进化方法则可广泛

①许国志. 系统科学[M]. 上海:上海科技教育出版社,2000:13-137.

用于求解这类问题，并在可以承受的计算时间内求得满意的近似解，如旅行商问题、装箱问题等。

（3）生物学领域：进化计算起源于对生物现象的模拟，现在又反过来用于生物学的研究，如利用进化计算研究小生境（Niche）理论和生物物种的形成等。

（4）计算机科学领域：进化计算广泛用于计算机科学的研究，如用于图像处理和自动识别以及文档自动处理等。

（5）工程应用：进化计算越来越多地用于工程实际，如通讯网络的优化设计、超大规模集成电路的布线、飞机外形的设计等。在自动控制领域中很多与优化相关的问题需要求解，遗传算法已在其中得到了初步的应用，并显示出了良好的效果。例如用遗传算法进行航空控制系统的优化、使用遗传算法设计空间交会控制器、基于遗传算法的模糊控制器的优化设计、基于遗传算法的参数辨识、基于遗传算法的模糊控制规则的学习、利用遗传算法进行人工神经网络的结构优化设计和权值学习等，都显示出了遗传算法在这些领域中应用的可能性。

（6）社会科学领域：进化计算在社会科学的许多领域也有广泛应用，如人类行为规范进化过程的模拟、人口迁移模型的建立等。

（7）人工生命：人工生命是用计算机、机械等人工媒体模拟或构造出的具有自然生物系统特有行为的人造系统。自组织能力和自学习能力是人工生命的两大主要特征。人工生命与遗传算法有着密切的关系，基于遗传算法的进化模型是研究人工生命现象的重要基础理论。

（8）机器学习：学习能力是高级自适应系统所应具备的能力之一。基于遗传算法的机器学习，特别是分类器系统，在很多领域中都得到了应用。

目前常见的软件或软件包有十几种，包括进化计算的各个方面，如遗传算法、平行遗传算法、进化策略、进化规划、遗传规划、分类系统等，并有 DOS 版本、Windows 版本、Unix 版本以及网络版本等。最新的软件可以通过互联网直接下载，美国海军后勤研究中心于 1985 年首先建立了全球性的有关遗传算法的网站，不定期编

辑出版遗传算法文摘，交流有关遗传算法的最新信息。

不过，进化计算的理论基础有待充实，尤其是进化规划和进化策略，这在一定程度上制约了进化计算的实际应用。建立进化计算的数学模型，奠定进化计算的理论基础，更深刻地认识进化计算的本质，是目前的热点和难点。算法的复杂性分析、算法的收敛性、收敛速度，与其他优化方法的结合而成的混合算法以及在非优化算法中的应用都是亟待解决的问题。

第 五 章

临界突变方法

——复杂组织突变机制分析

复杂组织涌现生成之后，经过适应维生、进化发展几个阶段，获得了稳定的生长和演化。但是，在大自然中，我们可以发现，事物的发展既有悠悠岁月，缓慢变迁，又有雪崩突变，暴风骤雨。遗传进化方法是遵循某种程序或算法，按部就班发展的分析方法，对于在临界边缘上的雪崩突变，遗传进化方法无能为力。巴克提出的自组织临界性理论为此填补了这个空白，也给科学方法的理论宝库提供了一种新的方法。我们将从自组织临界性理论中提升出一种新的科学方法——临界突变方法，用于进行复杂组织的突变机制分析。

第一节　自组织临界性理论的兴起

宇宙怎样从大爆炸中产生的几种基本粒子开始而逐渐演化出生命、历史、经济和文学？为什么大爆炸没有形成粒子的一种巨大气体或凝聚成一个巨大的水晶体呢？为什么在物理学家看来，宇宙之砖特别简单，无非是由夸克等基本粒子构成，但我们实际的自然界、人类社会却如此复杂？自然界为什么会有地震、森林火灾、雪崩？人类社会为什么会有金融海啸、股市崩溃、世界大战、改朝换代？这些现象都可以用自组织临界理论来刻画和分析。自组织临界性概念是巴克及其同事于 1987 年提出的研究系统复杂性行为的重要概念，它与分形、混沌以及复杂自适应系统等概念有异曲同

工之处，都是复杂性研究中最为重要的概念和理论之一。

一、临界现象

自然界中存在着这样一种现象，其复杂行为反映了有许多分支的大型系统会朝着均衡的临界态发展的一种趋势，这种方法偏离了平衡，而且微小的扰动可能导致大大小小的雪崩。大多数改变是通过灾难性的方式而不是通过遵循一种平衡渐变的线路来实现的。朝着这种非常微妙的状态演化并没有受到任何来自外部因素的影响。这种状态之所以建立起来仅仅是因为系统中的单个因素之间的动力学相互作用，即这种临界的状态是自组织来完成的。

让我们来看看海滩上玩沙堆的情形(图 5.1)。我们让沙粒缓缓流下而形成一堆沙，开始的时候，沙堆是平的，沙粒在附近的位置上靠得很近。它们的运动能够用它们的物理性质来理解。堆沙的过程在继续，沙堆变得来越陡峭，很少有沙粒沿着沙堆滑动。随着时间的推移，沙堆的滑动越来越大。最终，一些滑动的沙粒甚至跨越了整个沙堆或沙堆的大部分。在这一点上，系统远离了平衡，因而它的行为不再能用单个沙粒的行为来描述。雪崩形成了自身的内部力量，而这一点只有从对整个沙堆的性质的总体描述而不是从单个沙粒的简化描述才能得以理解。

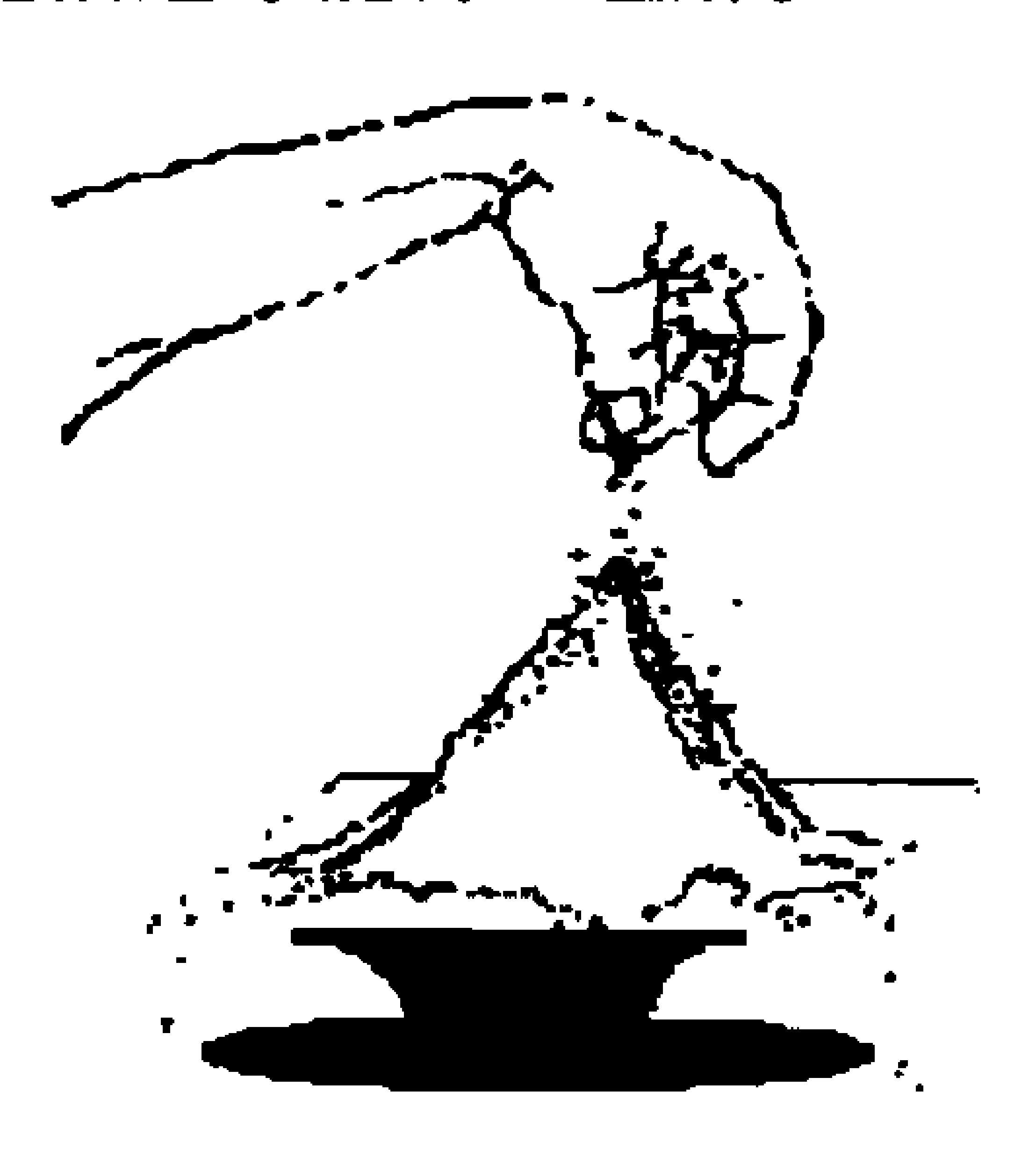


图 5.1　沙堆示意图

科学家们发现了一条新的自然法则，其印迹几乎遍布所有领域——磁石的极细微的运动、森林火灾的蔓延、物种的灭绝、地震分布、金融市场的起落、交通的走向、城市的发展、战争的爆发，甚

至服饰、音乐和艺术的趋势。无论我们看向何处,世界似乎都在一块简单的模板上塑造成型:像一个陡峭的沙堆一样,它正悬浮于动荡的边缘,如雪崩一样,在事物中遵循一种普遍的变化模式。

这一了不起的发现昭示了普遍共性的来临。美国科普作家马克·布查纳以文学家的敏锐鉴赏力和科学家的一丝不苟的精神写作了一本形象生动的科普著作:《临界——为什么世界比我们想象的要简单》。① 他在书中以生动的文笔介绍了全世界的日常生活中的各种神秘现象、揭秘这些现象背后规律的特立独行的探索者以及他们出乎意料的观点。他告诉人们这一新的普遍法则将如何改变我们对预测的理解,以及将如何使我们更容易地处理和控制未来。更重要的是,查布纳在阐明普遍共性如何是一门统一科学之时,指出它也许是包含一种"科学的科学"的初始,可能是人类文化和历史的一个动力。他在整本书中列举了自然、社会、政治、历史中的各色案例,下面仅是他在第一章列举的几个例子。

1. 第一次世界大战

1914 年 6 月 28 日上午 11 时,萨拉热窝天气晴好,司机带着奥匈帝国的弗兰兹·斐迪南大公和他的妻子阴差阳错地拐进了一个胡同,正好碰上塞尔维亚黑手党成员、19 岁的波-塞学生普林西普,于是大公夫妻在 30 分钟之内双双倒在了这位塞族学生的小手枪下。事发之后,奥地利以这次暗杀为借口,开始图谋入侵塞尔维亚。俄国为了保护塞族人,而德国则表明如果俄国介入,他们将站在奥地利一边。在 30 天内,这种国际间威胁和承诺的链式反应便调动了大量军力,将奥地利、俄国、德国、法国、英国和土耳其等国缠入了一个死结,于是爆发了第一次世界大战。当五年后大战结束时,一千万人为此付出了生命。

第一次世界大战爆发的原因当然错综复杂,然而其直接的导火索却就是这次"历史上最著名的拐错弯"引起的一次小小的枪击事件。一次看似随机的枪杀事件何以导致世界上如此惊天动地的

---

①马克·查布纳. 临界——为什么世界比我们想象的要简单[M]. 刘杨,陈雄飞,译. 长春:吉林人民出版社,2001.

大战呢？

2. 地震灾难

1995 年 1 月 17 日凌晨 5:45，一向被认为平静的日本“城市胜地”神户，在其西南 20 公里的一处地方，海底的几块小岩石突然开裂了。地壳的小规模重组每天都在发生，这是日本地表漂浮的大陆板块相互摩擦而慢慢积累的压力引起的。但这次作为小规模重组的断裂却没有及时停止下来。最初的几块岩石的断裂改变了附近其他岩石的受力，使它们也相继开裂。这样一直延续下去，仅在几秒钟之内，地面就裂开了一条大约 50 公里长的隙缝。随之而来的地震释放出相当于 100 颗原子弹的能量，发生了令人震惊的神户大地震！

其实近年来发生的我国汶川、玉树大地震，在南美接连发生的海地太子港和智利大地震，这些惊天动地的大地震是由什么引起的？能否预测和躲避？现代科学可以极其精确预测遥远的彗星和小行星的运动，然而却对我们脚下的地球运动难于成功把握和预测。

3. 森林火灾

美国黄石公园是著名的自然公园，一片宁静和自然。然而，1988 年 6 月末，一道闪电却引来了建园以来最大的一场大火，无论采取什么措施都无济于事，延续燃烧了两个多月，最后是烧遍了整个公园，带来了无法估量的自然、财产、人力、物力的巨大损失。我国的大兴安岭火灾也是如此。是什么使这场大火如此严重呢？为什么没有人预测到它的来临呢？

4. 股票崩溃

股票波动一直是炒股人的关注的热点。一直看似特别稳健增长的股市，为什么因为一些小道消息甚至毫无缘由地迅速下跌，以至任何人都难于控制的程度呢？在股票市场，我们经常听说“黑色星期一”“黑色星期五”之类的现象，例如前些年我国上证指数一度高达六千多点，为何突然会一路狂泻，到达一两千点而且长期难于

恢复呢？2010年5月，美国股指一日之内狂泻一千多点，至今也没有找到真正的原因。股票市场的起起落落是否有规律？股票崩盘是否能够预测并控制呢？

5. 物种灭绝

化石记录显示，我们星球上的物种数量在过去的六亿年中大致一直在平稳地增加着。然后，至少有五次，突发可怕的集体灭绝几乎毁灭了所有物种。这些物种灭绝的原因是什么呢？有人认为是小行星或彗星撞击引起地球气候的变化，有人认为并非如此，而是仅仅一个单一物种的灭绝偶尔引起其他物种的灭绝，然后相继引发其他物种的灭绝，最后以至于灾难的发生。

我们还可以举出无数这样的例子。① 在这些各种各样的小事件大结果的现象背后，具有什么样的共同规律呢？这些现象都与系统的临界性或临界现象有关。所谓的临界性(criticality)是指系统处于某个不稳定的状态点，只要有极其微小的动力，就将随机地进入完全不确定的未来状态的物理属性。临界性是相变物理学的一个重要概念。早在1869年英国物理学家安德鲁就发现，在31℃附近CO_2气体和液体的一切差别消失了，气液间的分界面也不见了。他把气化曲线上对应这一温度的点称为临界点。随后发现，相变是一种普遍的现象，于是相变物理学由此诞生。但相变物理学处理的只是平衡相变问题，对上述列举的临界现象都无能为力。

法国数学家托姆的突变论(catastrophe theory)对灾难性的突变事件进行了数学规律的研究，但它注重了突变的轨迹路线，对其动力机制没有揭示。20世纪80年代兴起的混沌理论(chaos)也研究了小事件大结果的现象，并以"蝴蝶效应"闻名。但混沌理论所揭示的是确定性如何产生随机性的问题，确定性带来了随机性。混沌虽然复杂，但却是有序的，因此还不是真正的复杂现象。要真正揭示上述临界现象，还需要创立新理论，等待复杂性理论的兴起。首先我们要问，这些各色各样的临界现象具有什么样的共同规律

①马克·查布纳.临界——为什么世界比我们想象的要简单[M].刘杨，陈雄飞，译.长春：吉林人民出版社，2001.

呢？它们看似不同，其实都与沙堆模型所演示的雪崩现象一致，而且从统计学的角度看，它们都与一种叫幂次定律的规律密切相关。

二、幂次定律

只要我们换个角度，就能发现这些复杂现象背后的一些规律。先来看一下自然界中已有的实验观察事实：灾难事件的发生、分形、$1/f$噪声以及兹波夫定律。[①]

(1)美国孟菲斯州立大学的约翰斯通(A. Johnston)和纳娃(S. Nava)收集了美国东南部新马德里地区1974—1983年间发生的地震的数据。他们发现，在双对数图上地震的大小的分布是一条直线。这表明地震大小的分布是幂次的，这个定律被称为古登堡-里希特(Gutenburg-Richter)定律。古登堡-里希特定律表明：大的地震并不扮演着特别的角色，它们和小的地震一样，遵从同样简单的定律。经济学上同样发现了类似于古登堡-里希特定律的规律。曼德尔布罗特(B. Mandelbrot)发现股票、棉花和其他许多商品的价格波动遵从一种极为简单的模式，即列维(Levy)分布，在双对数图上为一条直线。这表明价格波动也服从幂次分布。不仅如此，芝加哥大学的诺伯(D. M. Raup)教授利用斯普科斯基(J. J. Sepkoski)在图书馆里花十年功夫收集到的海洋物种的化石记录，作了一张关于物种灭绝率(即某个地质时期的物种的数量相对于前一个时期的物种的数量的减少率)的直方图。这张直方图表明大的灭绝事件和小的灭绝事件一样，落在一条光滑的曲线上。

(2)曼德尔布罗特用“分形”这个词来描述那些没有特征标度的几何结构，他从其令人惊奇的观察中得出结论：自然界是分形的。很典型的一个例子是挪威的海岸，它是一个由峡湾组成的递阶结构(hierarchical structure)，其中大峡湾里套着小峡湾，小峡湾里又套着更小的峡湾。“一个典型的峡湾有多大”这种问题是无法回答的，这种结构是“标度无关的(scale free)”。用不同基本标度的尺来测量海岸的长度会发现，需要的计数的标尺数目N与标尺

---

①李炜.演化中的标度行为和雪崩动力学[D].华中师范大学博士学位论文,2001:7-8.

的大小 δ(长度)是一个幂次关系。N 与 δ 的关系在双对数图上是一条直线,直线的斜率的负值就是海岸的分形维数 D。测量发现 D=1.52,表明挪威的海岸介于直线(维数为 1)和平面(维数为 2)之间。研究还发现山脉、云层和星系等自然界的许多结构都是分形的。

(3)一种被称为 $1/f$ 噪声的现象在许多系统中都观察到了,这些系统包括尼罗河、脉冲星、交通等等。英国地球物理学家赫斯特(J. Hurst)用了一生的时间来研究尼罗河的水平面的变化。他发现高水平面的持续时间长短不一,各种时间尺度都有。这个信号就是 $1/f$ 噪声。$1/f$ 噪声表明各种时间尺度都会出现,如果根据出现的频率把所有的时间尺度叠加成一个信号,会发现该信号的某个分量(时间尺度)的强度与该时间尺度的大小成反比,即时间尺度大的出现的机会要少,时间尺度小的出现的机会多一些,体现在双对数图上就是一条直线。IBM 公司的凡斯(R. Voss)还发现音乐的曲谱具有 $1/f$ 噪声的特征。

(4)哈佛大学的兹波夫(G. K. Zipf)教授在他 1949 年出版的《人类行为与最小努力的原则》一书中向读者展示了他对于人类起源系统某些简单规律的令人震惊的观察结果,兹波夫把城市按人口数量来划分等级,比如第一级的城市人口超过 800 万,第二级的城市人口为 500 万~800 万,第三级的城市人口为 100 万~500 万,如此下去。经过统计,他发现等级超过某个给定值的城市的数量与等级的大小在双对数图上是一条直线。类似的定律还在文学中发现。

上述的几种现象在自然界是极其普遍的,而且这些现象看起来千奇百怪,似乎毫不相干。但是它们却有着许多共同之处,最根本的相似点在于:它们都是一些统计规律,而且总可以找到一个量,这个量的分布在双对数图上是一条直线。双对数图上的一条直线意味着什么?数学上称之为"幂次定律",即某个量 $N(S)$ 能表示为另一个量 S 的幂次:

$$N(S) \sim S^{-\tau}$$

对于地震来说,S 可以表示地震释放的能量,而 $N(S)$ 则表示能量为 S 的地震出现的次数;对于峡湾来说,S 表示峡湾的长度,而

$N(S)$表示长度为 S 的峡湾的数量；对于分形的结构来说，τ 指的就是分形维数，S 代表 n 维盒子的大小，而 $N(S)$代表测量某个 n 维体需要的大小为 S 的盒子填充的数量；对于 $1/f$ 噪声来说，S 代表时间尺变，而 $N(S)$代表尺度 S 出现的频率。一句话，一个简单的幂决定律把如此众多、看似杂乱无章的现象全部联系起来。

幂次定律表明对于所观察的量而言没有一个特征尺度，各种大小的量均可以出现。这一点可以从直线看出，因为直线上没有钮结。现有的物理规律似乎还无法解释这一点。幂次规律的背后隐藏着什么样的物理机制？换句话说，是什么导致自然界中千差万别的现象能够产生如此简单而和谐的规律？有没有"普遍的"机制在支配着我们的自然界？现有的许多理论，比如平衡系统的理论、混沌理论，都无法回答这些为什么。试图研究这些开放的、拥有多个子单元且子单元间、子单元与外界环境有着复杂的相互作用的动力学系统所产生的行为，就必须抛弃简化论、还原论的思想，寻找新的探索途径。自组织临界性理论正是在这样的背景下提出来的。

三、自组织临界性的诞生与发展

自组织临界性(SOC)的概念是由丹麦物理学家帕·巴克及其博士后于 1987 年提出的。1985 年，巴克在美国布鲁克海汶国家实验室(BNL)工作，并与来自芝加哥大学的华裔博士后汤超(Chao Tang)及另外一位来自伯克利的克特·威森费尔德(Kurd Wiesenfeld)一起合作研究地球上和宇宙中数不清的 $1/f$ 噪声的来源。1987 年他们联名发表于美国《物理评论快报》(*Physical Review Letters*)的一篇文章中，第一次提出了 SOC 的概念。

这篇文章的题目叫做"自组织临界性：$1/f$ 噪声的一种解释"。①作者的最初意图只是想提出一种概念来解释自然界中极为常见的 $1/f$ 噪声谱。他们起初研究耦合摆，后来发现耦合摆的情况对于不学物理的人来说不容易想象，他们发现沙堆是更为形象的例子，于

---

①Bak Per, Tang Chao, Wiesenfeld. Self-organized criticality: an explanation of $1/f$ noise [J]. Phisical Review Letters, 1987, 59(4): 381-384.

是便有了 SOC 的经典模型——沙堆模型。

SOC 指的是一类开放的、动力学的、远离平衡的、由多个单元组成的复杂系统能够通过一个漫长的自组织过程演化到一个临界态,处于临界态的一个微小的局域扰动可能会通过类似"多米诺效应"的机制被放大,其效应可能会延伸到整个系统,形成一个大的雪崩。临界性的特征为,处于临界态的系统中会出现各种大小的"雪崩"事件,并且"雪崩"的大小(时间尺度和空间尺度)均服从"幂次"分布。这种分布被称为自组织临界态的指纹(fingerprint)。

SOC 的概念和思想提出来之后,得到了来自各界的高度评价和响应。该篇文章在数年内就被成千上万的论文引用,成为当时被引用最多的学术文献之一。SOC 一度成为理论的前沿,许多学者从各个领域和各个层面对其进行了实验和理论的探讨,于是理论框架逐渐被建构起来。巴克等人一开始用来研究 SOC 的模型是元胞自动机模型。在模型中没有控制参数,模型自然的演化,从随机状态达到一种自组织临界态而没有任何外部控制,在自组织临界态时事件的频度-大小的分布是分形的。巴克等人用这个模型成功的解释了产生 $1/f$ 噪声的根源。坚诺斯(Imre M. Janosi)研究了各向异性对 SOC 的影响,发现许多对各向异性敏感的特征函数具有能量的峰值分布,另一些参数只是在各向异性较大时受到影响,并且提出了一到五维的各向异性与特征参数之间一些定量的联系。德哈尔(Dhar)推导了 SOC 的有关数学性质,计算出了在临界态可能存在的状态数。威格拉斯(Vergeles)等人利用沙堆数值模型得出了 SOC 与温度无关;路易斯(Luis)和本格林(Bengrine)都进行了米堆数值模拟。本格林发现,对于一个足够大的系统,在一维 BTW 模型中,通常的临界行为与 SOC 行为之间存在一个急剧的转变。①

SOC 作为关于大自然复杂行为的一种新物理规律,迅速被应用于各个领域,涉及领域之广实在是令人们始料不及:岩层与地貌形成、河网与海湾结构、地震与火山爆发、星震与星云塌陷、黑洞与

①高召宁.自组织临界性、分形及灾变理论研究[M].西南交通大学博士学位论文,2008:7-10.

日晖耀斑、夸克与胶子团簇、生态与物种灭绝、变异与生命进化、噪声与全球变暖、人口与环境污染、大脑与神经网络、市场与价格变动、股票与金融危机、城市与交通堵塞，等等。①

SOC 理论被引进我国后，其理论和应用都得到了迅速的发展。华中师大的李炜最早以此为博士论文选题，并提出了 LC 雪崩模型。② 西南交大的姚令侃教授指导了一批博士生以 SOC 为题，展开了多个角度和层面的理论和应用研究。饶彬则以《复杂系统的自组织临界性研究》为题，对 SOC 理论进行了比较好的综述。③

在理解 SOC 这个概念时，有两个关键方面要考虑④：首先，这种临界性根本不同于平衡态统计力学中所指的平衡相变的临界性。平衡系统的相变是通过调节系统的某个参数而达到的，比如系统的温度。然而 SOC 的产生不需要调节系统的任何参数，它是通过系统内部的组元之间的复杂的相互作用而产生的，不依赖于任何参数，纯粹是系统自身的一种动力学。因而这种临界性被称为自组织的，不是依赖外部因素来干扰或驱动系统演化到临界态。其次，临界性体现了由短程的局域相互作用导致的系统组元间的一种长程的时空关联，这种关联的最终结果体现为雪崩事件的"标度无关性"，由幂次规律所表征。

第二节　自组织临界性的基本理论

SOC 自从 1987 年由巴克等人提出到现在，已经走过了二十余年，期间有许多人为其基本原理的建构作出了许多努力，也取得了许多理论成果，但到目前为止，SOC 的理论体系还没有全面建立，特别是缺乏严格的数学定义，缺乏严格的理论体系，更多的还是停留在模型和一些算法的层面。

---

①帕・巴克. 大自然如何工作[M]. 李炜，蔡勖，译. 武汉：华中师范大学出版社，2001：译者序.
②李炜. 演化中的标度行为和雪崩动力学[D]. 华中师范大学博士学位论文，2001.
③饶彬. 复杂系统的自组织临界性[D]. 国防科技大学硕士论文，2005.
④李炜. 演化中的标度行为和雪崩动力学[D]. 华中师范大学博士学位论文，2001：10.

一、沙堆模型与火灾模型

对 SOC 的研究可从实验和模型两个角度开展，特别是以元胞自动机为研究手段进行来解剖典型模型，其中沙堆模型和火灾模型是两个最典型的 SOC 模型。

（一）沙堆模型

沙堆是我们习以为常的东西，但其中孕育着复杂性的奥秘，也隐藏着混沌边缘的发生机制。① 假设有一张很平的桌子，我们往上面缓缓堆沙，比如说一次一粒。这些沙粒可以被丢在桌面的任何位置上，也可以全部对在桌子的某个固定的地方，比如桌子的中央。这种平面可以代表平衡态，这种态势能量最低。很显然，我们要从外面输入能量才能使沙堆具有某种形状。起初，落下的沙粒就停在原地。当我们陆续加沙时，沙堆就越变越陡，这时有一些小陡沙滑出现了，也就是说，雪崩开始发生了。所谓雪崩就是指某个沙粒的滑动会导致其他沙粒的滑动，而这些沙粒的滑动又会导致另外一些沙粒的滑动，以此类推。

在开始堆沙的时候，一粒沙的滑动只会带来一些局部的扰动，不会对整个沙堆带来戏剧性的变化。换句话说，沙堆的某个部分发生的沙粒崩塌事件对距离沙堆中这个部分较远的部分产生影响。在这个阶段沙堆内部没有整体交流，更多的只是沙粒作为个体的一种行为。

随着沙粒的不断加入，沙堆变得越来越陡峭，这时单个沙粒的倒塌很可能会影响系统中大量沙粒的倒塌。最终，沙粒的坡度会达到某个固定值，而且不会进一步增长，这时加入的沙粒的数量和从桌子的边缘落下的沙粒的数量是相等的。在这个阶段，沙堆所处的状态被称为稳定态。很显然，这时候整个系统的沙粒之间都有了相互交流，而且与系统一样大小的雪崩会出现。此时的沙粒系统即处于自组织临界态，耗散事件满足幂律定律，频谱具有 $1/f$

---

①帕·巴克. 大自然如何工作[M]. 李炜，蔡勖，译. 武汉：华中师范大学出版社，2001：54-60.

噪声的性质。①

实际的沙堆虽然特别形象,但操作起来有一定的困难,各种参数也难于控制,于是巴克小组采用一个数学模型来模拟沙堆的产生机制,并在计算机上利用元胞自动机来进行模拟仿真真实沙堆。这个仿真操作简单,但与实际的沙堆具有完全类似的性质。

用一个二维的方格子代表桌面。方格子盘中的每一个方格都有一个坐标(x,y),用一个数$Z(x,y)$来表示落在方格中的沙粒数目。对于一个100×100的方格子盘而言,x和y都从1变到100。模型采用的沙粒是"理想的沙粒",是体积为1的立方体,而且每粒沙的大小都一样。

加一粒沙到方格(x,y)中可以表示为:$Z(x,y)\rightarrow Z(x,y)+1$。为了表示沙粒的倒塌,需要引进"倒塌规则",这个规则允许沙粒从一个方格转移到临近的另外一个方格中。如果某个方格中的沙粒数$Z(x,y)$超过了临界值Z_c,Z_c数值可以任意设置,比如设置为3,那么这个方格就会向临近的四格方格中的每个方格输送一粒沙。因而,当Z达到4之时,那个方格的高度就会减少4个单位,而且临近的四个方格的高度分别增加一个单位。这个倒塌规则可以用下面的算法表示:

$$Z(x,y)\rightarrow Z(x,y)-4$$

$$Z(x\pm1,y)\rightarrow Z(x\pm1,y)+1$$

$$Z(x,y\pm1)\rightarrow Z(x,y\pm1)+1$$

上述的算法是一个递归过程,也就是说塌陷要一直进行下去,直到没有符合条件的塌陷为止。图5.2是该元胞自动机的一个简单演化示意图,刚开始时中间那个方格的沙粒数为3,给它添加一粒沙,沙粒数变为4,超过临界值,因此该方格塌陷,上下左右各得到一粒沙,而它自身则变为0。右面和下面的方格由于得到沙粒又超过了临界值,因此塌陷继续。整个过程共发生九次塌陷,其中有一个方格塌陷了两次,因此"雪崩"规模$s=9$。

图5.3显示了一个二维沙堆模型的雪崩的空间大小分布。在双对数图上这个分布是一条直线,表明这个分布是幂次的,直线的

①饶彬.复杂系统的自组织临界性[D].国防科技大学硕士论文,2005:21.

1	2	0	2	3
2	3	2	3	0
1	2	3	3	2
3	1	3	2	1
0	2	2	1	2

1	2	0	2	3
2	3	2	3	0
1	2	4	3	2
3	1	3	2	1
0	2	2	1	2

1	2	0	2	3
2	3	3	3	0
1	3	0	4	2
3	1	4	2	1
0	2	2	1	2

1	2	0	2	3
2	3	3	4	0
1	3	2	0	3
3	2	0	4	1
0	2	3	1	2

1	2	0	3	3
2	3	4	0	1
1	3	2	2	3
3	2	1	0	2
0	2	3	2	2

1	2	1	3	3
2	4	0	1	1
1	3	3	2	3
3	2	1	0	2
0	2	3	2	2

1	3	1	3	3
3	0	1	1	1
1	4	3	2	3
3	2	1	0	2
0	2	3	2	2

1	3	1	3	3
3	1	1	1	1
2	0	4	2	3
3	3	1	0	2
0	2	3	2	2

1	3	1	3	3
3	1	2	1	1
2	1	0	3	3
3	3	2	0	2
0	2	3	2	2

图 5.2 沙堆模型的雪崩过程

斜率即为幂次分布的幂次。图 5.4 显示了该二维模型的雪崩的时间大小分布，这个分布也是幂次的，由这个分布可以得到 $1/f$ 噪声谱。① 由此可以看出，沙堆模型能够产生 $1/f$ 谱，从而提出了一种解释 $1/f$ 谱起源的方案。

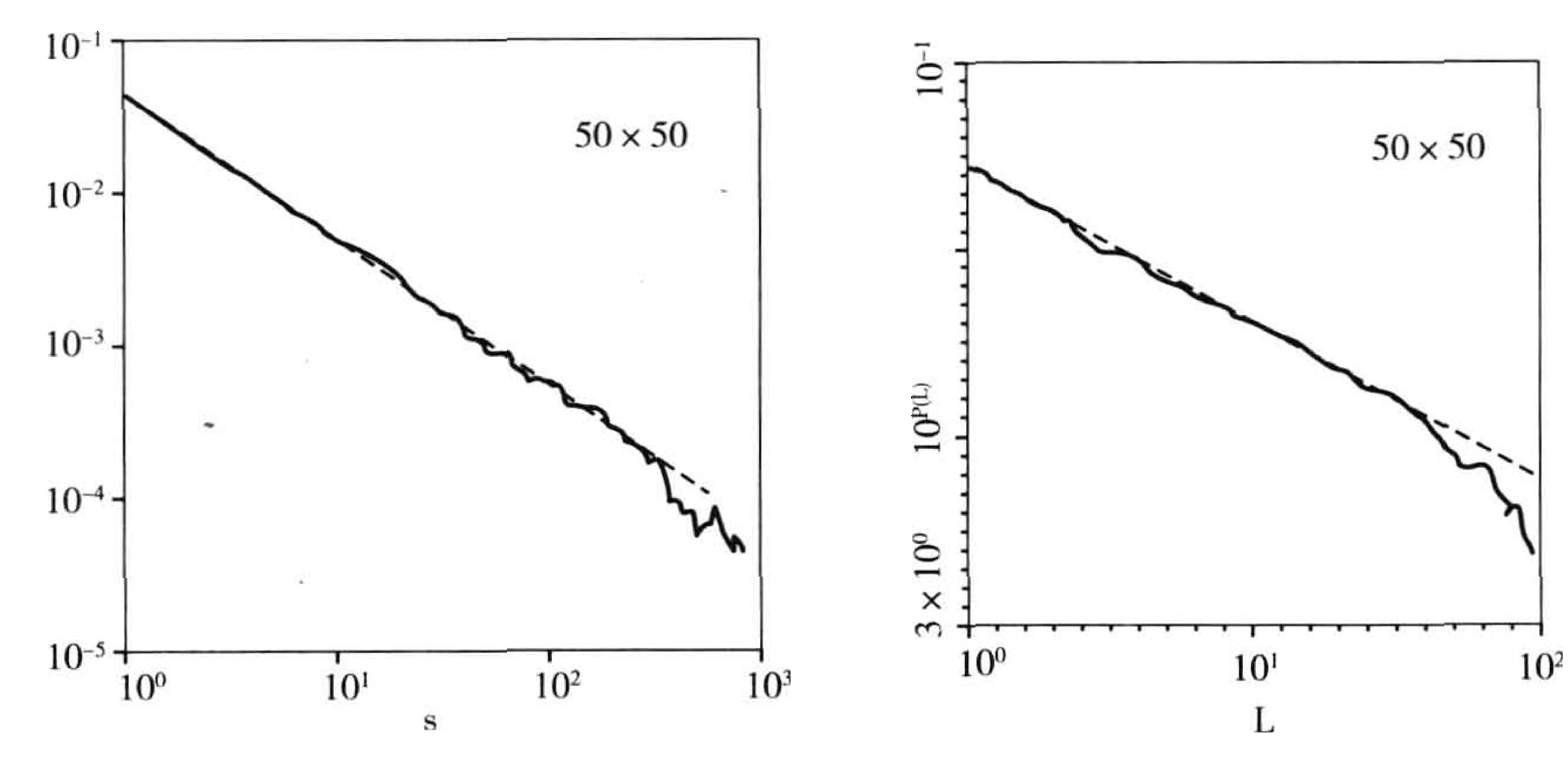


图 5.3 沙堆模型中雪崩的空间分布　　**图 5.4 沙堆模型中雪崩的时间分布**

对沙堆模型的数值模拟表明，开放、多自由度、远离平衡的动力学系统能够演化到一个稳定的自组织临界态。空间的标度律导

①李炜. 演化中的标度行为和雪崩动力学[D]. 华中师范大学博士学位论文，2001:14-15.

致自相似的分形结构，时间谱则是 1/f 噪声谱，所以沙堆模型是 SOC 思想的典型代表。不过，沙堆研究的结果还不是特别理想，为此福利特（V. Frette）等人利用"米粒"开展了 SOC 实验方面的研究工作。米堆实验更是取得了巨大的成功，从实验的角度证实了 SOC 的存在。①

（二）森林火灾模型

森林火灾模型（forest-fire mode）②是又一类演示 SOC 的重要元胞自动机模型。德罗斯（Drossel）（1992）最早提出经典的森林火灾模型，模型中通过一定的规则模拟树木的生长、火灾发生及火灾蔓延等过程。当达到自组织临界状态时，森林火灾的"频率-面积"分布满足幂律关系。

经典的森林火灾模型是一种结合蒙特卡洛模拟的元胞自动机模型，同沙堆模型一样，理论上可以定义在任意维。用得较多的是二维情况，根据以下演化规则进行同步更新：

（1）一颗着火的树变成空地；

（2）如果一棵树的最近邻（上、下、左、右四棵树）中任一棵在燃烧，那么它被点燃；

（3）以概率 p 随机选取一个方格，如果它为空地，则长出一棵树；

（4）没有最近邻为着火状态的树以概率 f 被点燃。

第 1 条模拟树木的燃烧；第 2 条模拟火灾的蔓延；第 3 条模拟树木的生长；最后一条模拟森林火灾的发生（如雷电及火种对森林的引燃等）。由于火灾蔓延的时间相对于树木生长和两次火灾的间隔来说足够小，因此火灾蔓延过程在一个时间步中结束。

图 5.5 是演化过程中截取的一段火灾分布图（白色代表空地，灰色代表数木，黑色表示火灾区域），和沙堆模型比较后发现火灾

①帕·巴克. 大自然如何工作[M]. 李炜，蔡勖，译. 武汉：华中师范大学出版社，2001：71-77.

②Drossel B，Scwhabl F. Self-organized Critical Forest fire Model Phys Rev Lett，1992. 转引自：饶彬. 复杂系统的自组织临界性[D]. 国防科技大学硕士论文，2005：23-25. 图 5.5 和图 5.6 也是引自该文。

在空间上的分布具有分形树的结构，而统计性质则在某个数量级之内具有幂律行为（图5.6），因此可以认为森林火灾系统具有自组织临界性。森林火灾模型的火灾形状具有分形树的结构，这是因为，树木的生成、燃烧都是随机的，呈线状关联，因此生成了分形树的“枝丫”；而在沙堆模型中，沙粒耗散都是均衡向四个方向坍塌，因此“雪崩”呈团状或块状。当然实际的森林火灾并不具有分形树结构，而是成片成片的。主要差别在于真实的森林是成片的，当然燃烧也是成片的，模型只是一种理想化的情况。

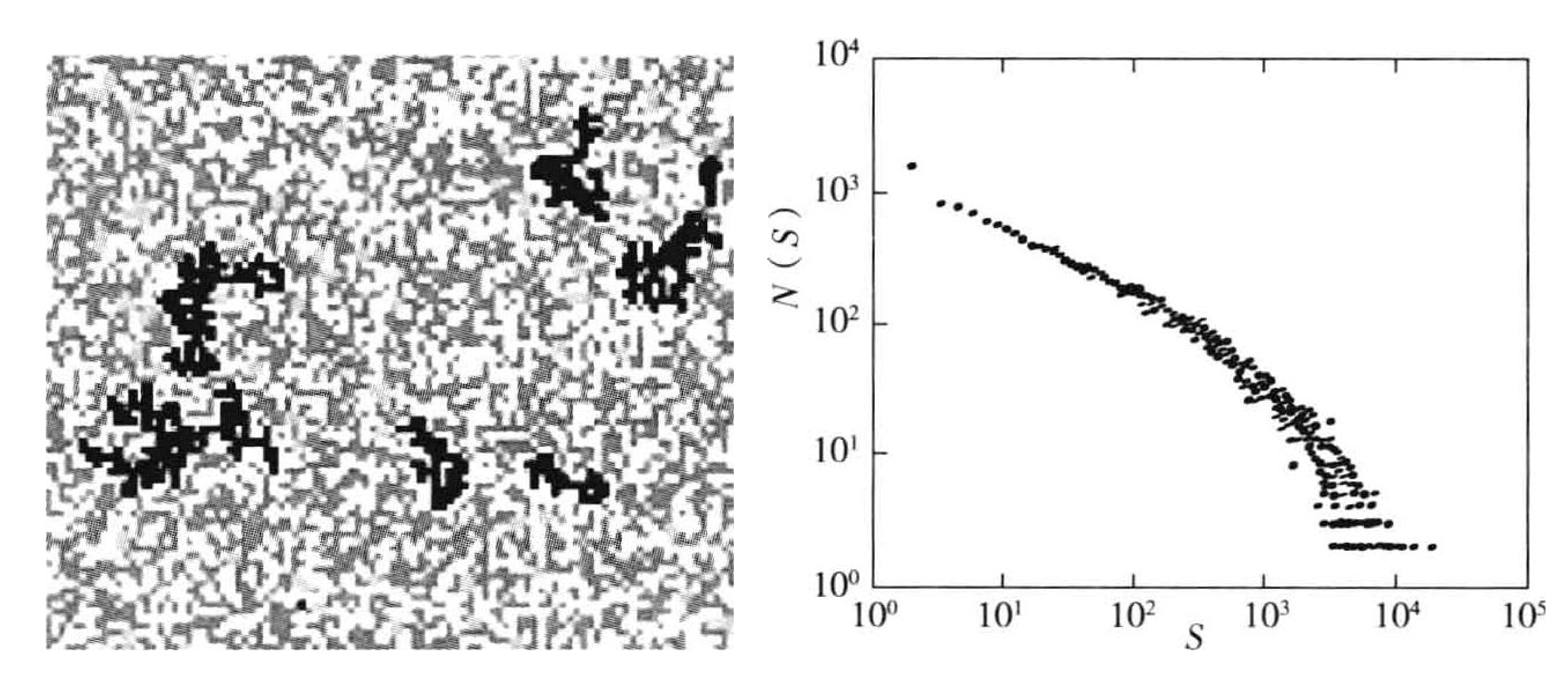


图5.5　森林火灾模型的火灾分布　　图5.6　森林火灾在双对数坐标下的分布

SOC研究中，模型的研究是人们研究的重点。目前已提出的SOC模型除沙堆模型、森林火灾模型外，还有许多著名的模型，还有许许多多的各类模型，比如米堆模型、生命游戏模型、生物演化模型、宇宙模型、胶子团模型、地震模型、经济模型和交通模型等等，不过，沙堆模型是SOC模型的典型代表。这些研究模型在SOC理论的建构和应用中起了重要的作用。

二、自组织临界性理论的基本内涵

SOC模型的研究主要内容体现在三个方面：①模型临界行为的研究，包括雪崩分布的标度行为、临界指数、平均场值、上临界维数以及普适类等。②SOC产生的基本机制研究，即什么是系统展示SOC行为的必要条件。③SOC与$1/f$噪声之间的关联研究。通过这些模型上述三个方面的研究可以建构SOC的基本理论。

SOC是关于具有时空自由度的复杂动力学系统的时空演化特

性的一个概念，它指的是一类开放的、远离平衡态的、由多个组元组成的复杂系统，不需要调节系统的外部参数，在外界驱动和内部组员间的相互作用下，能够通过一个漫长的自组织过程自发地演化到一个动力学临界态。在该临界态，系统展示长范围时空关联的雪崩动力学，并且雪崩的大小服从"幂次"分布。自然界和人类社会中都存在这样一种复杂的动力学系统，这些系统能够自发演化到"自组织临界状态"，达到这样的状态以后，系统的时空动力学行为不再具有特征时间和特征空间尺度，而表现出覆盖整个系统的满足幂律分布的时空关联，它包括四种现象：突变事件的规则性、分形、$1/f$ 噪声、标度律。

巴克认为，从揭示复杂系统的演化模式的角度来说，SOC 是迄今为止唯一可以解释复杂性如何产生的一般机制的理论概念。物理学定律是简单的，而自然界其实是复杂的；复杂系统的突变行为遵循某种简单模式（地震波的分布、棉花价格月度变化、地球上物种灭绝的地质学时间曲线图、沙堆模型）。SOC 理论的贡献在于，发现了这种耗散动力学系统的行为演化模式——即时间效应上的 $1/f$ 规律和空间结构演化的标度不变的自相似性。

SOC 理论认为，多种要素相互作用的大系统能够自发地朝临界状态演化：在这种自组织临界状态，一个小的事件会导致一个大事件乃至突变；SOC 理论是一种新的观察自然界的方式。其基本立场是，自然界总是处于持续的非平衡状态，由于系统内部要素之间的相互作用，它们可以组织成为一种临界稳定的状态，即临界态。

系统在 SOC 态时具有许多丰富的性质，在这种临界态势下，系统具有最大的复杂性、演化性和创新性。其最基本的特性有两个：时间效应上的 $1/f$ 噪声和空间效应上的标度不变性（分形）结构。①

（一）空间效应上的分形结构

分形（fractal）的概念最早是由曼德布罗特（Mandelbrot）于 1967

①饶彬. 复杂系统的自组织临界性[D]. 国防科技大学硕士论文，2005：13-14.

年提出来的。在传统的几何学中，维数为整数，例如点为 0 维，直线为 1 维，平面为 2 维等。而在分形学中，分维数 D 突破了整数的限制，例如海岸线的分维数 D 值可以取为 1.02，1.25 等。分形可以粗略的分为四大类：空间分形、时间分形、社会分形、思维分形。

它们之间并无严格的界限，且是相互关联的。目前关于分形尚无一个公认的定义，但一般认为分形具有下面列出的典型的几何性质：

（1）分形集具有任意小尺度下的比例细节，或者说它具有精细的结构。

（2）分形具有某种自相似的形式，即局部蕴含整体。

（3）分形维数一般大于相应的拓扑维数。

（4）分形分布可用如下幂指数分布定义：

$$N(S) = CS^{-D}$$

式中 S 为特征线度，如时间，长度等；$N(S)$ 为与 S 有关的物体数目，如个数，体积等；C 为待定常数，D 为分维数。我们看到上述公式与幂次定律非常相似，相差只是一个常数，实际上它们是同一个意思。分形、标度不变性、自相似以及幂次定律只是表述不同而已。正是因为处于 SOC 状态的系统在空间上具有幂律分布（标度不变性），这和分形的性质相似，因此巴克称分形为 SOC 在空间上的指纹。

SOC 在空间上的分形结构表明了系统的能量耗散转移规律，即能量的耗散无特征尺度，各种规模的情况都会出现，但是较小规模的耗散事件频繁，而较大规模的耗散事件出现的机会相对较少。根据上述公式还可以得出，如果一个系统在经历了一长串的小事件后，发生大事件的可能性将会增大，即公式反映的是宏观统计性质，而至于下一次事件发生在什么时候，这是无法预测的。

（二）时间效应上的 $1/f$ 噪声

噪声有时亦称随机涨落（random fluctuations），它们广泛出现于自然界和人类社会中。噪声或涨落可能来自测量误差，也可能产生于系统的内部，后者称为内部涨落（internal fluctuations），或者来自系统外部环境的随机扰动，称为外部涨落（external fluctuations）。

还有一种具有特殊性质的噪声,我们称之为标度噪声(scaling noise),即功率谱随着频率的增大按反幂律 $1/f^{\alpha}$ 而减小:$S(f)=f^{-\alpha}$ 其中 S 表示功率谱,f 表示频率,α 为正数。具有反幂律 $1/f^{\alpha}$ 分布的功率谱的噪声具有标度不变性(scale invariance)的重要特征,因此称之为标度不变噪声(scale invariant noise),有时简称为标度噪声。当 $\alpha=0$ 时为白噪声,$\alpha=1$ 时常称为 $1/f$ 噪声,$\alpha=2$ 时为布朗噪声,即布朗运动。

通常我们将具有反幂律 $1/f^{\alpha}$ 分布的功率谱的噪声,统称为 $1/f$ 现象(也叫 $1/f$ 分形信号或 $1/f$ 涨落)。$1/f$ 噪声的主要特点是长程相关性和统计意义上的自相似性,且是非平稳的。

记 s 为一次雪崩的规模,t 为一次雪崩的持续时间,显然雪崩规模越大,持续时间越长。因此空间上的幂律分布和标度不变性是导致时间上的幂律分布和标度不变性的直接原因。

记 $D(t)$ 为持续时间的分布函数,则 $D(t)$ 也有幂函数式的分布:

$$D(t)=t^{-\alpha}$$

时间上的标度行为表现为 $1/f$ 噪声。记 $S(f)$ 为耗散速度的功率谱,则由上式将直接导出频谱分布:

$$S(f)=\int\frac{tD(t)}{1+(ft)^{2}}\mathrm{d}t\approx f^{-2+\alpha}$$

$S(f)$ 具有 $1/f$ 噪声的性质,因此巴克称 $1/f$ 噪声为 SOC 在时间上的指纹。

总之,空间效应的分形结构和时间效应的 $1/f$ 噪声是 SOC 的两个基本特性,它们都具有标度不变性的特点,因此称为具有时空分形结构。

SOC 研究目前得出了一些初步的结论①:

1. SOC 存在的证据

幂律反映自相似性,它是标度不变性和分形之源,场量的时空

---

①李仕雄. 沙堆演化动态特性及自组织临界现象研究[D]. 西南交通大学博士学位论文,2004:4-5.

幂律分布是 SOC 的证据,它指出系统已经而且正处于自组织临界状态。

2. SOC 的涌现机制

广延耗散动力系统自发地向临界状态演化具有如下的动力学机制:

(1)非线性相互作用的多重耦合与叠加。

(2)SOC 的形成具有"元胞自动机"的动力学机制。

当来自随机介质的、在多重标度上相互作用的微扰(能量、动量和质量)持续施加于开放的复杂系统时,它们将引发其中的多组成耦合系统的相干与协同及多重耦合过程的相互作用动力学行为,通过持续的驰豫和衰减,系统自我调节以适应扰动,直到在总体守恒(global conservation)的条件下,使能量、动量和质量的运输达到稳健的非平衡定态(non-equilibrium steady state),这就是复杂系统的自组织临界状态。

(3)时空分形和长程时空关联。

空间分形结构和闪烁噪声分别是 SOC 的空间和时间指纹。在临界点,不同空间点上的微小涨落突然扩大而导致空间上的关联,其平均长度称为"关联长度(correlation length)";同样,在临界点附近,不同时间上的微小涨落也突然扩大而导致时间上的"关联时间";同时在临界点,时间上和空间上的关联时间和关联长度突然发生一定程度的发散,从而出现"长程时空关联(long range spatio-temporale correlation)"。正是在临界点出现的"长程时空关联"使复杂系统发生"自组织"而呈现有序的时空结构。

3. SOC 是分形动力学吸引子

分形来源于 SOC 动力学过程,系统一旦达到自组织临界态以后,微扰虽可使其发生偏离,但将通过呈幂律分布的一系列阵发式的崩塌或阶流等瞬变的驰豫过程和它们之间"点断平衡(punctuated equilibrium)"的相对静止与间歇而复归自组织临界态,因而自组织临界状态是一种"分形动力学吸引子"。

4. SOC 涌现于混沌边缘

动力学研究指出，系统的动力学行为受外部参量的控制，当外部控制参量逐步增大并超过临界阀值时，系统将相继经历不动点(非平衡动态)、极限环(周期性振荡)而达到混沌这样一系列由简单到复杂的吸引子。在周期区与混沌区之间存在一个极窄的区，由于从有序向混沌的转换与相转变类似，因此此区正位于有序与混沌之间的转变点(或临界点)上，为此兰顿称该转变点为“混沌的发生(onset of chaos)”，帕卡德和考夫曼称之为“混沌的边缘(edge of chaos)”，而巴克则称为“弱混沌(week chaos)”并认为它是 SOC 所致，安德森认为 SOC 是复杂适应系统的一种特征，兰顿和考夫曼的研究进一步指出，远离平衡的延展耗散动力系统自我调谐，自发地通过自组织过程演化而最终均衡且归宿于混沌的边缘，并涌现出自组织临界性。在混沌的边缘，复杂系统呈自组织临界态时，具有最大的复杂性、最大的演化性和最大的创新性；在混沌的边缘，在元胞自动机的计算机实验过程中出现了最大的计算容量和最多的信息、操作，表明在有序和混沌的转变点上，小输入可以引发大变化，即子系统之间的非线性相互作用结果可以涌现出大系统的总体变化。

5. 点断平衡反映了动力学系统向临界状态演化的趋势

许多自然现象断断续续地进行演化，这种例子包括地震、火山爆发、太阳耀斑、伽马射线爆发以及生物的演化。斯蒂芬(Stefen)把这种行为称为点断平衡，巴克认为点断平衡反映了动力学系统向临界状态演化的趋势，点断平衡对于复杂性现象的出现是非常重要的。

6. 系统在临界状态下会出现时空的无标度性

巴克认为系统一旦达到临界状态，就通过连锁反应维持在临界状态，在临界状态下，会出现时间和空间上的无标度性，在数学形式上对应着时空幂律关系，由于具有许多自由度，因此对大大小小的事件，尤其是灾难性事件进行预测原则上是不可能的。

三、自组织临界性理论的特征

SOC 的主要基本特征为:①系统是开放的,与外界有物质和能量的交换。②系统是远离平衡的复杂系统,系统内部组员之间有非线性的相互作用。③外部驱动时间标度与内部组员相互作用时间标度的分离。内部组员相互作用时间标度远小于外部驱动时间标度,即相对于外部驱动而言,内部组员相互作用是瞬间完成的。④动力学的演化是自发的,没有任何外界调控参数。⑤在临界态,系统会展示长范围时空关联的雪崩动力学,一个微小的局域扰动可能会通过类似"多米诺效应"的机制被放大,其效应可能会延伸到整个系统,形成一个大的"雪崩"。⑥雪崩的大小服从"幂次"分布。[①]

SOC 有下述特征[②]:①长程时空关联与连通性及时空分形结构。②崩塌动力学,复杂系统自发地向自组织临界状态演化,在这种临界状态,一个小的事件会引发大小不等的一系列连锁反应;临界性的特征为,处于临界状态的系统会出现各种"大小"的雪崩事件,并且雪崩的大小(时间尺度和空间尺度)均服从幂定律。③"元胞自动机"的动力学机制。④涌现于"混沌边缘",并具有最大的复杂性、演化性和创新性;临界性体现了由短程的局域相互作用导致的系统组元之间的一种长程时空关联,这种关联的结果最终表现为"雪崩"事件的标度无关性,细节的变化不会影响系统的临界性。其最基本的特征有两个:时间效应上的 $1/f$ 噪声和空间结构演化的标度不变的自相似性。$1/f$ 噪声表示系统的动力学行为受过去事件的影响,是合作效应的表征,与完全随机信号的白噪声(当下的动力学行为与过去的事件完全没有相关性)不同:它其实并不是噪声,而是 SOC 动力学的内在特征。系统演化行为遵循幂定律分布,幂定律的数学形式是:$N(s)=s^{-t}$,这里,$N(s)$ 是事件规模大小的数值,t 是指数,负号表示事件规模的数值随 s 的增加而下降。取对

①潘贵军.自组织临界性与复杂网络的若干问题研究[D].华中科技大学博士学位论文,2006:2.

②梅可玉.论自组织的临界性与复杂系统的演化行为[J].系统辩证学学报,2004(4):39.

数，得到$\log N(s) = -t \log s$。一个典型的例子就是地震活动，规模不大的地震活动经常发生，而剧烈的大地震情形并不多见。服从幂定律分布的动力学系统表明，系统结构内部存在自相似性。因此，SOC 被猜测是相互作用的多体系统所具有的典型行为，它无论是在时间还是空间上都具有丰富的分形结构。

从功能机制角度看，相互作用正是系统演化行为的根源。SOC 成功地解释了包含于千千万万个发生短程相互作用组元的时空复杂系统的行为特性。按照这一观点，许多复杂系统的行为特性可分为亚临界、临界和超临界三种状态，在正常情况下，这些系统都自然地朝着临界状态进化，然而一旦运行机制发生突变，系统可能进入超临界状态并持续爆发大规模的“雪崩”现象。SOC 概念有助于刻画这种多种要素相互作用的大系统的演化行为。

第三节 复杂系统的临界突变方法

组织的生成演化过程中，其状态的变化是多种多样的，有时候是连续的缓慢演化，有时候是急速的突变。达尔文的进化论和霍兰的遗传算法主要刻画的是状态缓慢变化的过程，而对急速变化的过程，托姆的突变论曾经试图进行结构描述，但对突变的规律还缺少科学的刻画。复杂性科学的理论分支中，巴克等科学家创立的 SOC 理论对临界现象及其突变的统计规律进行了系统的分析和刻画，为我们科学分析大量存在的各类组织的临界边缘的系统状态突变规律及其机制提供了科学方法新工具。

一、临界：系统突变的边缘状态

一个组织经过涌现生成诞生之后，再经过维生和发展阶段，稳打稳扎，逐渐成长。这是几个稳定发展的时期。霍兰的涌现生成理论、复杂适应系统理论和遗传进化理论分别对这几个阶段进行了科学的刻画，因此组织发展的这几个阶段都有了相关的科学依据的支持。然而，无论是霍兰的理论，还是达尔文的进化论，刻画的都是组织缓慢生长发展的过程，但是实际的组织既有缓慢变化

的渐变过程，也有急剧变化的突变过程。

大自然中，突变现象几乎发生在所有的领域，地震、泥石流、森林火灾、生物灭绝以及社会生活中的股灾、瘟疫和社会变迁等现象都是一些突发的事件。1914 年因为奥匈帝国斐迪南大公偶然被杀，引发了第一次世界大战。1988 年 6 月末，一道闪电引起了美国黄石公园的一小片森林的火灾，中间经过几次扑灭，并经过暴雨，然而死灰复燃之后又连续燃烧了两个月，烧毁了 150 万亩林地。一道或几道不起眼的闪电使黄石公园经历了历史上最严重的火灾。马克·布查纳在《临界》一书中，以生动的文学手法描绘了自然界中各种各样处于临界状态下发生的突发事件。他说："无论我们看向何处，世界似乎都在一块简单模板上塑造成型：像一个陡峭的沙堆一样，它正悬于动荡的边缘，如雪崩——在事物中遵循一种普遍的变化模式。"①

多年来这些突发的复杂现象一直困扰着许多科学家和哲学家，它们产生的根源是什么？自然界以什么方式进行演化？是否能够找到其变化的规律？从哲学上来说，马克思主义哲学很早就探讨了事物发展的两种普遍方式，即量变和质变。量变是一种缓慢的数量变化，变化前后其性质不会有重大的改变，而质变是一种爆发性的急速变化，除了数量变化之外，变化前后组织状态的性质也发生了变化。马克思主义哲学从哲学上区分了两种发展变化的方式，但由于受当时科学发展的限制，对变化的规律、路径、动力等细节问题虽有所触及，但仍然不够详尽，特别是缺少自然科学的依据。

最早对这些现象进行科学研究的是物理学中的相变理论。随着热力学的兴起，物理学家们逐渐认识到，固态、液态和气态这三种物体存在的状态中，从一种状态变化到另一种状态的过程中，在其临界阶段的变化特别复杂，并由此建立起相变理论。但是，相变理论还是建立在还原论基础上的简单性科学理论，对相变过程中的复杂现象和状态还缺少必要的科学刻画。

---

①马克·布查纳.临界[M].刘杨，陈雄飞，译.长春：吉林人民出版社，2001：9.

20 世纪 60 年代,法国数学家建立了刻画组织突变状态的突变论。突变论借用数学拓扑理论作为工具,对初等突变进行了分类,描述了突变的轨线,并建立了部分数学模型。突变论是研究组织突变状态的重大突破,它刻画了复杂组织突变的路径和轨迹,为我们理解突变的过程提供了科学分析的工具。但是,突变论对组织突变期间的刻画还比较粗糙,只对初等突变给出了几种路径的拓扑定性图形,对突变的规律、动力以及其他细节都没有细致的描述。

随着复杂性科学的兴起,组织突变的秘密和机理逐渐显现出来,让我们对其中的奥秘有了更加深刻的认识。复杂性理论中有两种相似但又有区别的理论分别对组织突变进行了探讨。这两种理论就是朗顿等人提出的混沌边缘理论和巴克等人提出的 SOC 理论。

混沌边缘理论有不少人已经触及过,但真正作为一个学科提出来的是美国圣菲研究所的朗顿,而考夫曼、帕卡德等人则把它发扬光大。所谓混沌边缘是指处于周期区和混沌区之间的一个极窄的区,此区正好位于有序和混沌之间的转变点(或临界点)上,为此朗顿等人称之为混沌边缘。朗顿在探索人工生命的过程中,发现在有序和混沌之间存在着一个类似物理学相变的区域,既不像有序区那么稳定不变,又不像混沌区那么不确定,而是在这个区域里组织存在着突变,比有序和混沌两个区域更充满着生机。朗顿和考夫曼等人认为,混沌边缘就是生命有足够的稳定性来支撑自己的存在,又有足够的创造性使自己名副其实为生命的那个地方;是新思想诞生的边缘地带,是复杂系统能够自发地调整和存活的地带,更是一个经常变换在停滞与无政府两个状态之间的战区。[①]"混沌的边缘是自我发展进入的特殊区界,在这个区界,系统会产生出类似生命的现象和复杂的行为表现。"[②]朗顿虽然意识到混沌边缘的有趣现象,但他因忙于人工生命研究,对混沌边缘的理论建构也没有深入下去。

---

①米歇尔·沃尔德罗普.复杂[M].陈玲,译.上海:三联书店,1997:5.

②米歇尔·沃尔德罗普.复杂[M].陈玲,译.上海:三联书店,1997:424.

真正使突变现作为一门科学并进行深入研究的是美籍丹麦科学家巴克、美籍华裔科学家汤超以及美国科学家维森菲尔德,他们在对噪声、耦合摆特别是沙堆等试验研究的基础上,正式提出了刻画临界、突变的一门新科学,他们称之为自组织临界性(SOC)。巴克等科学家发现,大自然中,临界性行为是一种普遍的行为,而且这种行为是组织系统自组织而成的,没有外界的干预。临界性看似复杂,甚至似乎无规律可循,但它们在双对数坐标上却表现为一条直线,简洁得像牛顿第二定律 $F=ma$ 那样干脆。巴克说:"自组织临界系统演化到复杂的临界态时没有受到任何外界作用的干预。自组织过程发生时经历了一个非常长的暂态时期。复杂行为,无论是地球物理学上的或生物学中的,总是由一个漫长的演化过程产生的。"①

SOC 经典的例子就是一堆沙子。一个沙堆展示了临界行为,其中渐变的郁制期由于不断有沙滑下而被打断。沙的下滑或雪崩是由多米诺效应造成的,其中单个的沙粒推动一个或更多其他的沙粒从而导致它们下滑。那些倒下的沙粒又轮流地以链式反应的方式和其他沙粒产生相互作用。临界现象的大雪崩不是逐渐的改变,而是把质的行为和量的行为连在一起,从而形成了突发现象的基础。巴克认为,从临界性研究中发现,不稳定性和大灾难是不可避免的,"自组织临界性可以看做是灾难主义的理论判据"。②

SOC 是观察大自然的一种新方法,其基本的图像是,大自然在某处永久地偏离平衡,却又被组织在一种稳定状态中,这种状态就是自组织临界态。SOC 理论表明,复杂系统在远离平衡的临界态上运作,以阵发、混沌并类似雪崩的形式演化,而不像通常观点认为的那样遵循一种平缓、渐变的演化方式。SOC 解释了大自然中存在的看来相当复杂的某些普遍存在的结构,地震、大灭绝,还有人类的工业革命和社会革命都是这样的雪崩式演化。如果世界被组织成临界状态或与之很接近的某种状态的话,那么即使最微小的力量也会产生巨大的影响。

---

①帕·巴克.大自然如何工作[M].李炜,蔡勖,译.武汉:华中师范大学出版社,2001:32.
②帕·巴克.大自然如何工作[M].李炜,蔡勖,译.武汉:华中师范大学出版社,2001:33.

混沌边缘理论和SOC理论是既相似又不同的两种描述临界突变的复杂性理论。通过计算机仿真表明，SOC和混沌边缘二者是相通的，处于自组织临界状态的系统正好位于混沌的边缘上。朗顿和考夫曼的研究进一步指出，远离平衡的广延耗散动力系统自我协调，自发地通过自组织过程演化而最终均衡且归宿于混沌的边缘，并涌现出自组织临界性。由此可以看出混沌边缘、SOC和弱混沌实际上是同一个意思，但是由于混沌边缘和SOC的概念本身比较模糊，目前还没有确切的理论依据证明它们是一致的。

二、幂率：边缘状态的规律刻画

在临界、边缘的突变行为，由于其属于急速的变化，并且是难于预测，因此要进行科学的刻画还真有一定的难度，但如果没有科学的刻画，没有找出隐藏在背后的规律，那么边缘状态的突变行为就将永远藏匿在黑暗之中。因此发现边缘状态的突变行为的规律是走向科学研究的重要一步，也是判断是否处于边缘突变的重要科学依据。

马克思主义哲学用质变量变规律来描绘了质变、量变的行为和规律，但由于当时自然科学的限制，只能停留在哲学的猜想之中，难于有更加细致的科学描述，更难于变为科学方法的实用判据。突变论虽然已经走上了科学化、数学化的道路，但所构造的势函数特别复杂，难于有解析解，只有几种特殊的类型能够得到可解的函数方程式。于是托姆走上了拓扑描述的道路，退而求其次，得到了一部分几何图形的走势轨迹。不过，几何图形是一种定性图形，不是定量的规律表述。混沌边缘理论虽然发现了混沌边缘会产生许多新奇行为，但没有发现其科学规律，也没有找到相应的刻画方法。

传统的研究方法的一个共同特点是寻求每种突变的具体路径和规律，就像分子物理学家要去寻求每个分子的运动轨迹和规律一样。因为突变是在特别短暂的时间里发生着巨大的变化，而且这样的变化还很难追究其具体的路径。分子物理学家后来改变了研究方法，不再单独跟踪单个分子的规律，而是利用统计的手段，统计分析大量分子的运动规律，结果发现，从单个分子来看似乎是

没有规律，但从统计视野来看，大量的分子却显示出明确的统计规律，这就是后来兴起的统计物理学。热力学也是按照统计物理学的思路才取得了后来的巨大成就。

巴克等人也像统计物理学家一样，不再追究单个突变事件的确切规律，而是从统计的视野去重新观察、研究大量临界突变事件的群体性规律。他们发现，从统计的视野看，像地震、1/*f* 噪声、火灾等诸多的雪崩性事件，如果进行大量的统计分析，它们都遵循一种简单的模式。从 SOC 理论看来，各种事物都能按照完全确定的统计规律发生。以地震为例，何时何地将发生多大震级的地震，这是很难预测和回答的问题，但如果对已经发生的地震进行统计后发现，地震的发生遵循一种不可思议的简单分布函数。美国孟菲斯大学的约翰斯通和娜娃收集了美国马里兰地区 1974—1983 年十年间的地震数据。他们发现在双对数图上地震大小的分布呈现为一条直线，这就是著名的古登堡-里特（Gutenburg-Rchter）定律。[①]这个定律令人震惊！这个定律表明，大地震并不占有特殊的地位，它们和小地震一样服从同样的规律。因此人们似乎不应当只设法找到大地震的特定解释，而是应当找到包括所有地震的普遍理论，无论这些地震是大还是小。

某种东西在双对数坐标中是一条直线，从数学上来说就是遵守“幂次定律”，因为它们表明某个量 N 能用另外一个量 s 的幂次表示出来：

$$N(s)=s^{-\tau}$$

在这里，s 可以是地震中释放出来的能量，而 $N(s)$ 就是释放那个能量的地震的数目。s 也可以是海湾的长度，而 $N(s)$ 就是具有那个长度的海湾的数目。对上式两边都取对数，我们会发现

$$\log N(s)=-\tau\log s$$

这表明 $\log N(s)$ 和 $\log s$ 的关系在图上表现为一条直线，幂次 τ 是直线的斜率。幂次定律也被称为标度不变性，因为从双对数的直线任意一处看起来都一样这个简单的事实中看出来，在这个标

①帕·巴克.大自然如何工作[M].李炜，蔡勖，译.武汉：华中师范大学出版社，2001：13.

度上并没有什么特性使这个标度显得很特别。

巴克说,所有这些问题的关键在于,在大自然中幂律行为屡见不鲜。无论是从太阳的活动,从银河之光,还是从通过电阻的电流和河流的流动中,都能看到这种现象。巨大的冲动极为鲜见,小的冲动却随处可见。但所有规模的冲动频率都符合幂次定律。"因而,解释复杂系统中呈现的统计特性这个问题数学上就转化为解释潜在的幂次定律,并且要进一步转化为幂次的值这个问题。"①

巴克认为系统一旦达到临界状态,就通过连锁反应维持在临界状态,在临界状态下,会出现时间和空间上的无标度性,在数学形式上对应着时空幂律关系。幂律反映自相似性,它是标度不变性和分形之源,场量的时空幂律分布是 SOC 的证据。② 由此可见,幂次定律在 SOC 研究中处于极其重要的地位。对这个幂次定律我们要从两个方面来理解:第一,它是 SOC 阶段雪崩或突变行为宏观规律的表现,是对大量相互作用单元微观相互作用机制的统计规律的一种宏观刻画,因为面对大量相互作用单元我们无法单独刻画每一个单元的具体行为和规律,但我们可以用统计方法从宏观层面去找出规律,而这个幂率就是巴克他们寻找到的规律。第二,幂次定律是判断 SOC 出现与否的科学判据。判断在一个时间序列中所发生的事件,是否服从幂律分布,一般的方法是将这些事件按照大小排序,然后应用统计的方法进行判断。但是在应用这一标准进行 SOC 判断的时候,不可避免地存在一些争论。李仕雄认为,SOC 现象一定会导致幂律,但幂律并不一定都是 SOC 现象。③ 也就是说,SOC 现象应该一定符合幂律,反过来却不一定成立,即符合幂律的现象却不一定就是 SOC 现象。因此仅靠是否符合幂律还不能判断一个现象是否就是 SOC 现象,还要结合其他分析才能作出判断。

总之,临界状态涉及广延系统在相变时的行为,此时可观测量

---

①帕·巴克.大自然如何工作[M].李炜,蔡勖,译.武汉:华中师范大学出版社,2001:28.

②PerBak,ChaoTang, and Kurt Wiesenfeld. Self-organized criticality: an explanation of l/f noise [J]. Physical Review Letters. 1987,59(4):381-384.//李仕雄.沙堆演化动态特性与自组织临界现象研究[D].西南交通大学博士学位论文,2004:66.

③李仕雄.沙堆演化动态特性与自组织临界现象研究[D].西南交通大学博士学位论文,2004:68.

都是无标度的，也就是说，这些可观测的量都是没有特征标度。相变时，很多组分的微观部分的作用所引起的宏观现象，是只考虑单一部分构成的系统重复应用微观定律后出现的一种合作效应。① 从宏观统计的角度来看，自组织临界性表现为空间效应上的幂次定律或标度不变性，时间效应上的 $1/f$ 噪声。这是边缘突变状态的宏观刻画。

三、雪崩：边缘突变的过程描述

SOC 行为最大的特征是，一个系统如果处于 SOC 状态，只要一个微小的触动，就有可能引发连续的连锁反应，最后导致巨大的变化，甚至发生灾难性的雪崩事件。幂次定律只是从统计学的角度做了宏观规律的刻画，但如果我们要更细致地了解边缘突变，就必须进一步深入到突变的具体过程和轨迹的描述，巴克的 SOC 理论使用雪崩方程来刻画。

“雪崩”这个名词术语应当源于大自然的突发现象，它指的是带来毁灭性后果的一连串事件，自然界中随处可见。最经典的雪崩例子就是千年雪山的崩塌现象，那是真正的雪崩。由于气候的变化，雪山融化松动，如果此时有登山者或其他某种诱因引起微小的崩塌，立即一发不可收拾，带来巨大的雪崩事件，甚至登山者被雪崩掩埋的悲剧。第二个常见的雪崩例子是山体滑坡，大量的泥土和山石从高处滑到山的一边，带走了成千上万吨沙石和泥土，严重的时候还会危及森林，房屋等。由于雪崩现象无所不在，从米堆到喜马拉雅山的沙堆，从河流网络到地震、星震甚至日辉，从生物到经济，因此雪崩现象被认为是各种复杂结构形成的潜在机制。所以，李炜博士认为，雪崩是某些复杂动力学系统的一个直接结果。②

生物进化的断续平衡理论认为进化是以爆发的形势发生的，而不是通过达尔文认为的按缓慢且始终不变的方式进行的。在灭

---

①K · Christensen, N. R. Moloney. Complexity and Criticality[M]. London: Imperial College Press, 2005: Forward.

②李炜. 演化中的标度行为和雪崩动力学[D]. 华中师范大学博士学位论文, 2001: 43.

绝或新物种产生方面，长期的停滞不前会被间歇爆发活动打断。最壮观的时间是五亿年前的寒武纪爆炸过程，导致了新物种、新种类和新藻类的出现，同时也导致了大约六千万年前恐龙的灭绝。单个物种的进化遵从同样的模式。在很长一段时间里，物理性质，例如一匹马的大小或象鼻子的长度，不会改变太多；这些平静的时期被那些短得多的时期或者说断续期所打断，断续期的贡献可能使整个情况发生戏剧性的变化。沙堆展示了它们自身的断续平衡。在很长一段时间里几乎没有任何活动。这种平静的平衡很快就被遍布沙堆的沙蹦做打断，从而改变了一切事物的运行方式。沙堆中的雪崩与进化中的断续有着惊人的相似之处。断续或者雪崩是 SOC 出现的标志。①

自然界千变万化的模式展现了各个层次上的复杂的宏观结构。处理复杂系统时，主要重于描述宏观结构上的时空动力学，而不是停留在其内在结构上。雪崩实际上是由局域的动力学相互作用所导致的一种宏观现象。在 SOC 模型中，雪崩的时间尺度和空间尺度，可能会依赖于系统的动力学细节和系统的初始状态。但雪崩大小的统计分布，即幂次规律，却是与动力学细节无关的。从这种意义上来说，雪崩研究是处理复杂系统的一个合适的工具。②

对自然界中的许多事实，如分形结构、$1/f$ 噪声、河流、脑的活动，以及一些自然现象和社会现象，包括地震、经济活动和生物演化等的观察表明，这些现象是时空复杂性出现的信号，它们能通过雪崩的分形特性联系在一起。这些经验观察可通过同样的动力学即雪崩动力学统一起来。雪崩动力学机制有助于我们理解系统的许多潜在的基本特性，为研究系统的复杂性提供可靠的依据。

雪崩发生的微观机制当然是复杂的，但从宏观来看，我们可以用雪崩方程来描述其规律。每一个雪崩过程都有一定的差别，因此可以用不同的雪崩方程来反映。比如，Bak-Sneppen 生物演化模型（简称 BS 模型）其实就是一个雪崩模型。李炜曾经介绍过 BS 雪

---

①帕·巴克. 大自然如何工作[M]. 李炜，蔡勖，译. 武汉：华中师范大学出版社，2001：119.
②李炜. 演化中的标度行为和雪崩动力学[D]. 华中师范大学博士学位论文，2001：43.

崩、PMB 雪崩、顺时(forward)雪崩和逆时(backward)雪崩等雪崩过程和方程。① 有些雪崩方程是连续的微分方程或偏微分方程,而有些则是离散的方程,甚至是算法模型。这些方程都有些复杂,因此我们在这里就不详细介绍。

雪崩方程无论是简单还是复杂,是连续还是离散,其本质都是对雪崩行为的过程刻画,是属于运动学方程而不是动力学方程。在各种雪崩方程中,适应度是其中的一个重要参数,它用来刻画雪崩发生的临界点。单个适应度是对个体层次的刻画,为了从宏观、整体上刻画雪崩的发生,李炜和蔡勖提出了平均适应度来刻画。②

我们来看看沙堆模型中,雪崩是如何发生的。当系统演化到一定的状态时,假定此时系统中没有沙崩的事件发生。继续往沙堆上加沙,格点上的沙粒数达到或超过阈值 z_c,根据规则,该格点会倒塌,这就会影响它的四个最近近邻。最近邻的格点会接着倒塌,从而又影响其他格点的进一步倒塌。最后,当所有格点上的沙粒数均再次小于 z_c时,这个雪崩就结束了。由此可见,一个雪崩的发生总是由某个事件引起,即雪崩结构存在着某种触发机制。这个触发事件上引发了异常雪崩,而这种效应会一直延续到整个雪崩过程结束。在沙堆模型中,触发时间是沙粒的加入。沙粒的加入使得某个格点上的沙粒数超过了其临界值 z_c,该格点就会倒塌。该点的倒塌又会引起周边临近点的崩塌从而引发雪崩。在这里,格点上的沙粒属于系统的局域动力学变量,正是沙粒数的变化和适应性的变化(局域动力学变量的改变)引发了各自系统的雪崩过程。SOC 系统雪崩的发生需要一些必要的条件,我们有必要为此做一些探讨。斯塔龙(Stølum)认为在任何一个动力系统中雪崩的发生必须具备三个条件③:

(1)存在两个相互对抗的作用 X 和作用 Y,这两种作用对系统产生两个完全相反的效应。对沙堆来说,作用 X 相当于向沙堆添

---

①李炜. 演化中的标度行为和雪崩动力学[D]. 华中师范大学博士学位论文,2001:45-49.

②李炜. 演化中的标度行为和雪崩动力学[D]. 华中师范大学博士学位论文,2001:49.

③Hans-Hemrik Stølum. Fluctuations at the self-organized critical states[J]. Physical Review E 1997,56(6):6710-6718. //李仕雄. 沙堆演化动态特性与自组织临界现象研究[D]. 西南交通大学博士学位论文,2004:65.

加沙粒，增加沙堆的潜在能量，即沙堆的势能，引起沙堆规模增大；作用 Y 将潜在的能量（势能）转换成动能和热能，引起沙堆发生雪崩，使沙堆规模减小。

（2）两个相互对抗的作用之间是单向的依赖关系，作用 Y 总是依赖于作用 X，但作用 X 不依赖于作用 Y，当且仅当作用 X 存在的时候，作用 Y 是系统的内部作用。对沙堆来说，作用 Y 引起沙堆发生雪崩是由于作用 X 向沙堆添加沙粒，而作用 X 向沙堆添加沙粒并不是因为作用 Y 引起沙堆发生了雪崩，当且仅当作用 X 向沙堆添加沙粒，作用 Y 引起沙堆发生雪崩是系统内在机制的结果。

（3）这两作用在状态空间上相互竞争。

当这三个条件满足的时候，两个相互对抗的作用 X 和 Y 驱动系统进入自组织临界状态的吸引子轨道，进而达到临界状态，在 X 的持续扰动作用下，系统在临界状态附近波动，并通过雪崩的连锁反应维持在临界状态，系统出现自组织临界性。他将自发地向临界状态演化并维持在临界状态的机制，用图 5.7 来描述。①

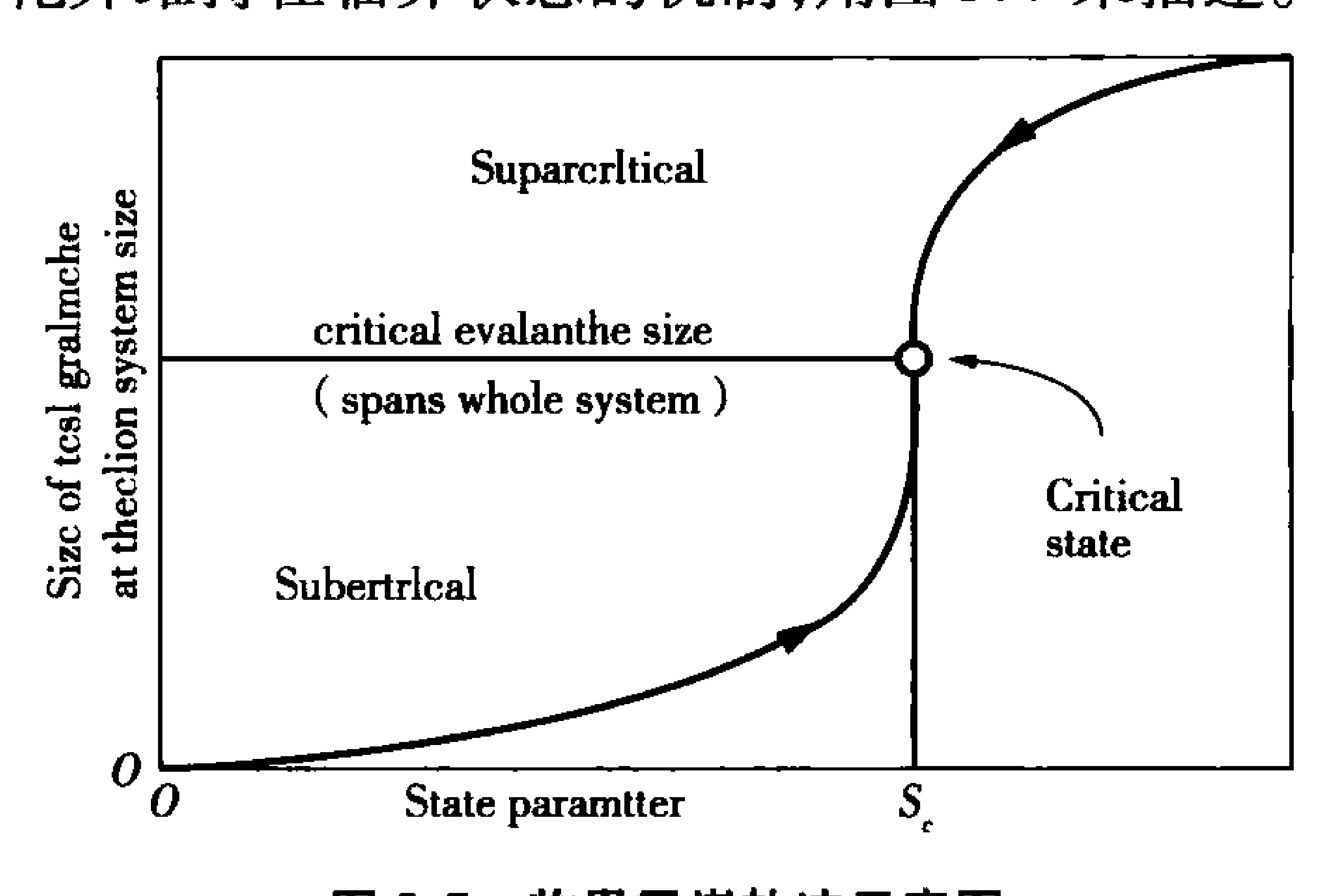


图 5.7 临界雪崩轨迹示意图

四、自组织：边缘突变的动力机制

SOC 理论研究了临界态下的幂率规律以及雪崩行为和方程，

①该图转引自李仕雄. 沙堆演化动态特性与自组织临界现象研究[D]. 西南交通大学博士学位论文,2004:65.

但是这些复杂突变行为是怎么发生的呢？换句话说，是什么动力引起了雪崩行为的发生的？我们有必要对临界突变的动力机制做一些探讨。

从SOC的定义和雪崩过程的描述中，我们已经知道，临界系统的各种复杂行为的发生都是在没有外力的作用下由系统自身的相互作用而产生的，是一种自组织的行为。

所谓自组织并不是说系统要与外界隔绝，必须是一个孤立的系统，恰恰相反，系统必须是开放的。普利高津的耗散结构理论早就揭示了一个孤立系统只能走向无序。因此，SOC系统要出现临界雪崩行为，必须是一个开放系统，并必须从外界注入能量。例如，在沙堆模型中，外界要不断注入沙粒。通过开放，系统才能跟外界建立物质、能量和信息的联系，才能抵消系统产生的无组织力量。因此，能产生SOC行为的系统必须是一个广延耗散动力系统。

但是，SOC特别是雪崩行为的发生，其动力并不是来自外部，而是由于系统的自组织的作用下形成的。SOC理论认为，由大量相互作用成分组成的系统会自然地向SOC态发展；当系统达到SOC态时，即使小的干扰事件也可引起系统发生一系列灾变。SOC系统的一个共同特征是，能量注入是持续的、缓慢的、均匀的；能量耗散相对于能量注入来说是瞬时的、“雪崩式”的。当系统达到SOC态时，能量耗散事件的强度或尺度分布服从幂律关系。所以虽然系统与外界紧密联系，是一个开放的耗散系统，但系统产生临界性和雪崩却是自组织引起的。系统外部能量的注入表明系统在临界态时是远离平衡态的、开放的。能量的注入和自组织并不矛盾，沙堆模型需要人为不断添加沙粒，但人并没有刻意去组织沙堆形成临界态，临界态完全是靠沙堆内部的驱动力自发形成的，也就是自发形成临界态，而且是动态有序的。

所谓“自组织”是指该状态的形成主要是由系统内部组织间的相互作用产生，而不是由任何外界因素控制或主导所致。所谓“临界态”是指系统处于一种特殊敏感状态，微小的局部变化可以不断放大、扩延至整个系统。也就是说，系统在临界态时，其所有组分的行为都相互关联。因为在临界态时，系统内事件大小与其频率之间是幂函数关系，这时系统不存在特征尺度；也就是说，事件发

生在所有尺度上,或与尺度无关。例如,沙堆模型中,沙堆一达到"临界"状态,每粒沙与其他沙粒就处于"一体性"接触,那时每粒新落下的沙都会产生一种"力波",尽管微细,却能贯穿沙堆整体,把碰撞次第传给所有沙粒,导致沙堆发生整体性的连锁改变或重新组合;沙堆的结构将随每粒新沙落下而变得脆弱,最终发生结构性失衡而坍塌。临界态时,沙崩规模的大小与其出现的频率呈幂函数关系。

自组织之所以能够在 SOC 系统中引起临界现象和雪崩的产生,与该系统大量组分之间的相互作用紧密相关。系统外界物质、能量、信息等输入,通过系统内部的短程、局域相互作用,能够将系统输入传遍整个系统,由此可以产生整体的作用。因此,我们可以说,所有的 SOC 模型都是包含相互作用的模型,否则系统无法到达 SOC 态。① 但是对不同的系统而言,相互作用的形式千差万别。在沙堆系统中,某个沙粒的倒塌会影响其邻近沙粒的倒塌,相互作用可以通过力的形式传递;在生物系统中,某个物种的变异会导致其邻近物种的变异,相互作用可以通过食物链的方式传递;在经济系统中,某个顾客的需求可以导致一连串的事件,相互作用是通过买卖双方的交易而进行的;在地震模型中,相互作用通过不同板块间的力的传递而进行。相互作用的形式对具体系统而言是具体的,其形式并不重要。相互作用的存在保证了个体与个体、个体与外界环境的交流,从而推动整个系统的自组织过程,使系统达到临界态。应当说,相互作用是自组织的"推动力",这种推动不是外界的,而是来自系统内部,因为相互作用是局域的而且是个体间(或个体与环境间)的作用。因此,相互作用可以说是系统的一个内部自由度。系统的相互作用将系统推到临界态,只有在临界态下,只要极其微小的触发就会产生巨大的雪崩。

SOC 系统能够通过漫长的自组织过程,从一个毫无关联的状态演化到系统内部存在在高度关联(时间和空间上)的状态。一旦这种高度关联的状态达到,对系统的一个微小的扰动就可能会传

---

①李炜.演化中的标度行为和雪崩动力学[D].华中师范大学博士学位论文,2001:77.

播到整个系统,形成一场雪崩过程,而且雪崩具有各种各样的大小。因此系统中的个体在自组织过程相互作用从而推进了整个演化的进程,使得系统往临界态发展。这表明个体间(包括个体与外界环境)的相互作用、相互交流在演化中扮演着十分重要的角色。那么,什么样的条件才能产生自组织并由此产生临界性和雪崩行为呢? 这是一个比较复杂的问题。不过,李仕雄博士经过详细的研究,梳理出 SOC 发生雪崩的四条判断标准①:

(1)系统包含大量发生短程相互作用的组元,组元之间是一种最近邻位置的相互作用。

(2)系统是一个开放的系统,外界不断地向系统提供物质(或能量),系统以某种方式向外界耗散掉物质(或能量):外界物质(或能量)的输入,系统物质(或能量)的输出,这两种相反的作用,在状态空间相互竞争。

(3)系统输入与输出在总体上达到平衡的临界状态,并维持在这种临界状态,即使发生连锁反应,产生长程相关,系统的整体稳定性也不会遭到破坏,其动力学行为保持鲁棒性。

(4)在总体的临界状态下,系统对外界物质(或能量)耗散的时空关联函数都应是幂次的。

处于临界状态下的事物倾向于表现出相似的组织,这种组织不存在于哪些系统的具体细节和组织要素中,而是从这些细节背后基本几何和逻辑的极为深刻的框架中产生的。无论什么事物都会有临界形式。所以当某一事物被认为处于一种临界状态之中时,我们就可以不必考虑大多数细节而理解其主要特性了。② 许多事物,例如经济、生态群落,甚至科学自身的运动,都具有这种组织的特性。把阶段过渡放到一边,转向这些系统,我们可以预见,既然临界状态只有集中,并且界限分明,那么世界上存在的组织种类其实十分有限。表面上看来大相径庭的事物也许在组织形式上极其相似。

---

①李仕雄.沙堆演化动态特性与自组织临界现象研究[D].西南交通大学博士学位论文,2004:68.

②马克·布查纳.临界[M].刘杨,陈雄飞,译.长春:吉林人民出版社,2001:128.

第四节 临界突变方法的应用及其局限

自从巴克及其合作者于1987年首次提出SOC的概念以来,已经有成千上万篇关于这方面的论文在各种杂志上发表。物理学家、生物学家、经济学家、计算机专家等各个领域的科学家纷纷把这种概念引入他们自身的工作领域,建立了各种各样的模型,得到了许多令人关注的结果。许多实验室还利用沙堆、米粒和泥土来展开SOC实验方面的工作,也取得了很大的进展。随着研究的深入,SOC的研究手段也拓展了不少,除了计算机模拟以外,还包括平均场近似、微扰方法、重整化方法和主方程的运用等解析手段。这些都极大推动了SOC的应用和发展。

作为观察大自然的一种新方法,SOC的主要目的是想要解释大自然为什么是复杂的而不是简单的。它解释了自然界中某些普遍存在的结构,比如分形、$1/f$噪声等。它的应用范围也极其广泛,其中包括地震、脉冲星、黑洞、地貌、生命演化、大脑、经济和交通等,大自宇宙,小到基本粒子的层次。

作为复杂性的理论之一,SOC理论具有以下几个局限①:

第一,从某种意义上来说,它是不充分的。复杂性蕴藏着巨大的变化,这种变化的存在排除了所有的细节都能被浓缩成数学方程的可能性。SOC可能解释为什么会存在着变化性,或者是哪种特别情况会出现,但它不可能解释某个特定系统的某个特定的结果。

第二,SOC理论是抽象的。譬如,一个关于生物演化的SOC模型从原则上来说应当能够描述演化的所有可能的情形,适用于大象,也适用于猴子。因此,这个理论考虑的不是具体情形,也不青睐任何特例。

第三,它是一种新型的统计理论,不依赖于系统的初始条件和

---

①李炜. 演化中的标度行为和雪崩动力学[D]. 华中师范大学博士学位论文,2001:10.

任何细节部分,也不会产生特定的细节。细节的变化不会影响系统的临界性。因此,它不描述细致的图像。

作为一种思想,SOC 理论并非十全十美(比如,大多数 SOC 模型考虑的情形过于简单,而对某些系统,像生物系统和经济系统来说,某种程度上的因素是必须考虑的),但它仍不失为一个创举。它把看似毫不相干的现象用一个简单的幂次规律联系在一起,并且试图解释这些现象背后隐含的物理机制。作为复杂性理论的早期尝试,SOC 的思维方式有很多借鉴之处。它关于系统整体性质的考虑方式在处理复杂系统时是非常有用的。正如巴克在他的《大自然如何工作》一书给中国读者的话中写的那样:"自组织临界性不是复杂性的全部,但它或许打开了通向复杂性的一扇大门。"①

①帕·巴克. 大自然如何工作[M]. 李炜,蔡勖,译. 武汉:华中师范大学出版社,2001:Ⅳ.

第六章

复杂网络方法

——复杂组织系统结构分析

复杂网络理论是复杂性科学的最新理论分支,是刚刚提出和正在探索的新理论,但已经成了复杂性科学的重要组成部分。小世界现象和无标度网络的发现,不但开创了复杂网络研究这个新领域,而且对系统科学特别是复杂性研究也具有重要的意义。网络不但是许多复杂系统的结构形态,而且是复杂系统结构的拓扑结构模型。按照复杂网络理论,作为系统的现实事物,其结构可以抽象为网络,构成要素可以被抽象为节点,相互作用可被抽象为节点之间的连线或边,这样就可以运用复杂网络理分析的理论、方法和工具进行复杂系统结构的拓扑特性研究。复杂网络理论及其方法为复杂系统的结构分析提供了一个科学的分析工具,并为科学方法的理论宝库提供了新内容。

第一节　复杂网络理论的兴起

很多人可能都有这样的经历,偶尔碰到一个陌生人,同他聊了一会儿后发现你认识的某个人居然他也认识,然后你们会一起发出"这个世界真小"的感叹。那么对于地球上任意两个人来说,借助第三者、第四者这样的间接关系来建立起他们两人的联系,平均需要通过多少人呢? 20 世纪 60 年代美国哈佛大学的心理学家米尔格兰(Milgram)的著名的小世界实验(社会调查)给出的推断是:地球上任意两个人之间的平均距离是 6。也就是说,中间只要通过

平均5个人的传递,一个人就能与地球上任何一个角落的另一个人建立联系。这就是著名的六度分离(six degrees of separation)推断。尽管这个平均数6不一定很准确,但它反映了人与人之间的平均距离与全球人口数量相比是一个非常小的数。

自然界中存在的大量复杂系统都可以通过形形色色的网络加以描述。一个典型的网络是由许多节点与连接两个节点之间的一些边组成的,其中节点用来代表真实系统中不同的个体,而边则用来表示个体之间的关系,通常是当两个节点之间具有某种特定的关系时连一条边,反之则不连边。有边相连的两个节点在网络中被看作是相邻的。例如,神经系统可以看作是大量神经细胞通过神经纤维相互连接形成的网络;计算机网络可以看作是自主工作的计算机通过通信介质如光缆双绞线、同轴电缆等相互连接形成的网络。类似的还有电力网络、社会关系网络、交通网络,等等。

数学家和物理学家在考虑网络的时候,往往只关心节点之间有没有边相连,至于节点到底在什么位置,边是长还是短,是弯曲还是平直,有没有相交等都是他们不在意的。在这里,我们把网络不依赖于节点的具体位置和边的具体形态就能表现出来的性质叫做网络的拓扑性质,相应的结构叫做网络的拓扑结构。那么,什么样的拓扑结构比较适用于描述真实的系统呢? 两百多年来,对这个问题的研究经历了三个阶段。在最初的一百多年里,科学家们认为真实系统各因素之间的关系可以用一些规则的结构表示,例如二维平面上的欧几里德格网,它看起来像是格子T恤衫上的花纹;又如最近邻环网,它总是会让你想到一群手牵着手、围着篝火跳圆圈舞的姑娘。到了20世纪50年代末,数学家们想出了一种新的构造网络的方法:两个节点之间连边与否不再是确定的事情,而是根据一个概率决定。数学家把这样生成的网络叫做随机网络,它在接下来的40年里一直被很多科学家认为是描述真实系统最适宜的网络。直到最近几年,由于计算机数据处理和运算能力的飞速发展,科学家们发现大量的真实网络既不是规则网络,也不是随机网络,而是具有与前两者皆不同的统计特征的网络。这样的一些网络被科学家们叫做复杂网络(complex networks),对于它们的

研究标志着第三阶段的到来。①

在20世纪即将结束之际,对复杂网络的科学探索发生了重要的转变,复杂网络理论研究也不再局限于数学领域。人们开始考虑节点数量众多、连接结构复杂的实际网络的整体特性,在从物理学到生物学的众多学科中掀起了研究复杂网络的热潮,甚至于被称"网络的新科学"。② 特别是,国际上有两项开创性工作掀起了一股不小的研究复杂网络的热潮。一是1998年6月,美国康奈尔(Cornell)大学理论和应用力学系的博士生瓦茨(Watts)及其导师斯特罗盖茨(Strogatz)在英国《自然》杂志上发表了题为《"小世界"网络的群体动力行为》的文章,引入小世界(Small-World)网络模型,进一步揭示了复杂网络的小世界特性,并建立了一个小世界网络模型。小世界网络描述从完全规则网络到完全随机网络的转变,它具有于规则网络类似的聚类特性,又具有与随机网络类似的较小的平均路径长度。③ 斯特罗盖茨是从事非线性动力学研究的专家。特别是在耦合振子同步方面他做了许多重要的工作。夏日窗外蟋蟀叫声的共鸣就是耦合振子同步的一个典型例子。瓦茨和斯特罗盖茨当初是从研究大量耦合振子构成的网络系统的同步问题中受到启发,而考虑社会网络中的小世界现象的。二是1999年10月,美国圣母(Notre Dame)大学物理系的巴拉巴斯(Barabasi)教授及其博士生阿尔伯特(Albert)在美国《科学》杂志上发表了题为《随机网络中标度的涌现》一文,揭示了复杂网络的无标度性质,并建立了一个无标度网络模型。④ 该文指出,许多实际的复杂网络的连接度分布具有幂律形式。由于幂律分布没有明显的特征长度,该类网络又被称为无标度(Scale-Free)网络。这两篇文章分别揭示了复杂网络的小世界特征和无标度性质,并建立了相应的模型以阐述这些特性的产生机理。以这两篇文章的发表为标志,复杂网

---

①周涛,等.复杂网络研究概述[J].物理,2005(1):31-35.

②汪小凡,等.复杂网络理论与应用[M].北京:清华大学出版社,2006:8.

③Watts,D. J. &Strogatz,S. H. Collective dynamics of small-world networks[J]. Nature,1998,393:440-442.

④Barabasi,A. L. &Albert,R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science,1999(286):509-512.

络研究进入了一个新时代。复杂网络理论研究再也不局限于数学的范畴，而是开始受到了从物理学到生物学，从工程技术到管理和社会科学的众多学科的研究人员越来越多的关注，并研究了各种复杂网络的各种特性。

国外的复杂网络研究很快在我国引起了反响。2001 年春季开始，陈关荣、李翔、汪小凡等以研究具有小世界和无标度拓扑结构的动态网络的同步化问题为切入点，开始进入复杂网络研究领域。① 从 2002 年起，在短短几年中，国内不同学科的研究人员和青年学者对复杂网络研究的兴趣越来越浓，至今国内已召开过多次以复杂网络为主体的学术会议和论坛。2004 年 4 月在无锡召开了有 40 余人参加的首届全国复杂动态网络学术论坛。2005 年 10 月在北京召开的由中国高等学术研究中心组织的第二届全国复杂网络学术论坛的参加人数已经超过了 150 人。此外，中国系统工程学会于 2004 年 10 月在浙江大学组织了全国复杂网络研讨班；中国数学学会于 2005 年 1 月在上海交通大学组织了复杂网络学习班；武汉大学在国内率先成立了校级复杂网络研究中心，并于 2005 年春季组织了全国复杂网络学术会议；上海理工大学还成立了上海系统科学研究院并编辑出版了复杂网络文集。

目前，复杂网络研究在国内外正如火如荼地进行，其理论和应用都取得了迅速的发展。遗憾的是，就目前而言，科学家们还没有给出复杂网络精确严格的定义，从这几年的研究来看，之所以称其为复杂网络，大致上包含以下几层意思：首先，它是大量真实复杂系统的拓扑抽象；其次，它至少在感觉上比规则网络和随机网络复杂，因为我们可以很容易地生成规则和随机网络，但就目前而言，还没有一种简单方法能够生成完全符合真实统计特征的复杂网络；最后，由于复杂网络是大量复杂系统得以存在的拓扑基础，因此对它的研究被认为有助于理解“复杂系统之所以复杂”这一至关重要的问题。

一般而言，网络系统的复杂性体现在以下几个方面②：

---

①汪小凡，等. 复杂网络理论与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2006：前言.

②汪小凡，等. 复杂网络理论与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2006：8.

1. 结构复杂性

网络连接结构看上去错综复杂、极其混乱(图6.1)。网络连接结构也可能是随时间变化的,例如,在万维网上每天都不停地有页面和链接的产生和删除。此外,节点之间的连接可能具有不同的权重或方向。例如,神经系统中的突触有强有弱,可以是抑制的也可以是兴奋的。

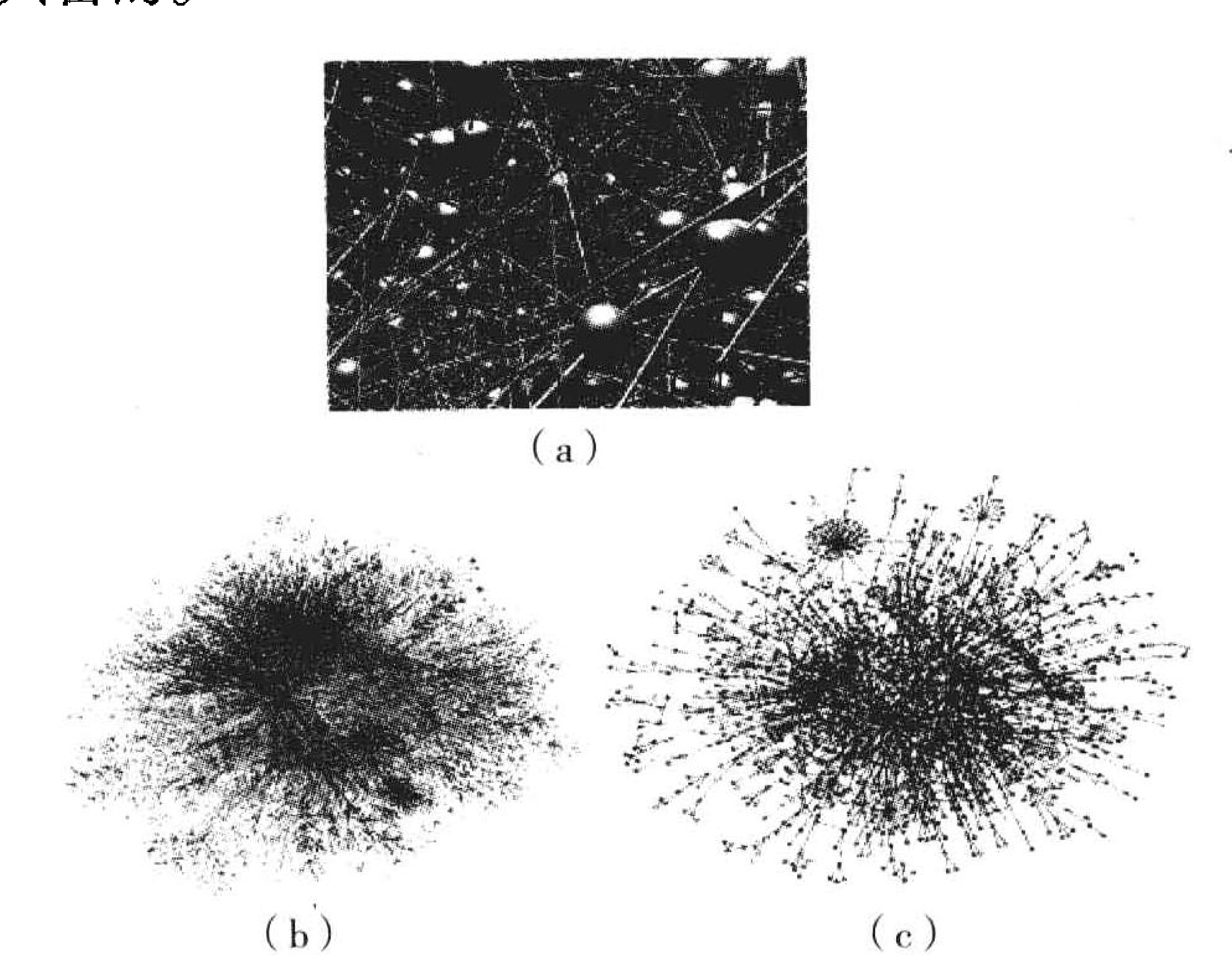


图6.1 三个具有复杂连接结构的实际网络示意图

(a)澳大利亚堪培拉的一个社会关系网络结构示意图(A. S. Klovdabl);
(b)Internet上部分IP地址的连接结构示意图(W. R. Cheswick);
(c)蛋白质相互作用网络结构示意图(H. Jeong)

2. 节点复杂性

网络中的节点可能是具有分岔和混沌等复杂非线性行为的动力系统。例如,基因网络和Josehpson结阵列中每个节点都具有复杂的时间演化行为。而且,一个网络中可能存在多种不同类型的节点。例如,控制哺乳动物中细胞分裂的生化网络就包含各种各样的基质和酶。

3. 各种复杂性因素的相互影响

实际的复杂网络会受到各种各样因素的影响和作用。例如,

耦合神经元重复地被同时激活，那么它们之间的连接就会加强，这被认为是记忆和学习的基础。此外，各种网络之间也存在密切的联系，这使得对复杂网络的分析变得更为困难。例如，电力网络的故障可能会导致因特网流量变慢、金融机构关闭、运输系统失去控制等一系列不同网络之间的连锁反应。

过去关于实际网络结构的研究常常着眼于包含几十个，至多几百个节点的网络，而近年关于复杂网络的研究中则常可以见到包含从几万个到几百万个节点的网络。网络规模尺度上的变化也促使网络分析方法作出相应的改变，甚至于很多问题的提法都要有相应的改变。

复杂网络研究的简单历史见表6.1。①

表6.1 复杂网络研究的简史

时间/年	人　物	事　件
1936	Eüler	七桥问题
1959	Erdos 和 Rényi	随机图理论
1967	Milgram	小世界实验
1973	Granovetter	弱连接的强度
1998	Watts 和 Strogaiz	小世界模型
1999	Barabási 和 Allteri	无标度网络

第二节　复杂网络理论的构成

自从复杂网络研究成为一个新科学而被国内外学者进行广泛研究以来，复杂网络理论的基本范式就逐渐显露出来，其基本概念、基本模型、基本理论、基本方法得到了基本的确立，应用领域也越来越多，影响日益广泛。

①汪小凡，等. 复杂网络理论与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2006：8.

一、复杂网络的研究内容

复杂网络是对复杂系统非常一般的抽象和描述方式，它突出强调了系统结构的拓扑特征。原则上说，任何包含大量组成单元(或子系统)的复杂系统，当我们把构成单元抽象成节点，单元之间的相互作用抽象为边时，都可以当作复杂网络来研究。复杂网络可以用来描述物种之间的捕食关系，人与人之间的社会关系，词与词之间的语义联系，计算机之间的网络链接，神经元之间的通讯反馈作用，蛋白质之间的相互关系，等等。自从复杂网络理论提出以来，各国科学家反应迅速，对它进行了理论、方法和应用等全方位的研究，其内容得到了快速的拓展和丰富。

就目前而言，复杂网络的研究可以简单概括为三方面密切相关却又依次深入的内容：通过实证方法度量网络的统计性质；构建相应的网络模型来理解这些统计性质何以如此；在已知网络结构特征及其形成规则的基础上，预测网络系统的行为。具体展开后可以归纳为：

(1)发现规律：揭示刻画网络系统结构的统计性质，以及度量这些性质的合适方法。这方面的内容属于复杂网络拓扑结构的静态统计分析，包括更广泛的实证研究和更深入的理论刻画，如给定度分布基础之上的匹配模式，各种相关关系，加权网络的统计性质和描述方式，网络的聚类等。其中在自然科学领域，网络研究的基本测度包括：度(degree)及其分布特征，度的相关性，集聚程度及其分布特征，最短距离及其分布特征，介数(betweenness)及其分布特征，连通集团的规模分布。

(2)建构模型：建立合适的网络模型以帮助人们理解这些统计性质的意义与产生机理。复杂网络的演化和机制模型，实证上可以研究实际网络演化的统计规律，检验 BA 模型的偏好连接假设；理论上则可以发展完善的具有形成特定几何性质的网络机制模型。

(3)分析行为：基于单个节点的特性和整个网络的结构性质分析与预测网络的行为。主要内容有复杂网络上的传播机理与动力学分析，复杂网络的容灾分析以及复杂网络中的社团结构及其搜

索算法。

(4)控制走向:提出改善已有网络性能和设计新网络的有效方法,特别是稳定性、同步和数据流通等方面。根据复杂网络的相关理论,特别是网络容错性和攻击鲁棒性,以及网络上的传播、同步与共振等各种动力学过程,提出复杂系统的设计方案,改善复杂系统的性能。

总之,网络的结构与功能及其相互关系是网络研究的主要内容,结构与功能的相互作用(特别是其对网络演化的影响)是复杂网络研究需要解决的重要的问题。为了完成上述内容的研究,三种概念在当代对复杂网络的思考中占有重要地位。①

第一,小世界的概念。它以简单的措辞描述了大多数网络尽管规模很大但是任意两个节(顶)点间却有一条相当短的路径的事实。以日常语言看,它反映的是相互关系的数目可以很小但却能够连接世界的事实,例如,在社会网络中,人与人相互认识的关系很少,但是却可以找到很远的无关系的其他人。正如麦克卢汉所说,地球变得越来越小,变成一个地球村,也就是说,变成一个小世界。

第二,集群即集聚程度(clustering coefficient)的概念。例如,社会网络中总是存在熟人圈或朋友圈,其中每个成员都认识其他成员。集聚程度的意义是网络集团化的程度;这是一种网络的内聚倾向。连通集团概念反映的是一个大网络中各集聚的小网络分布和相互联系的状况。例如,它可以反映这个朋友圈与另一个朋友圈的相互关系。

第三,幂律(power-law)的度分布概念。度指的是网络中顶(节)点(相当于一个个体)与顶点关系(用网络中的边表达)的数量;度的相关性指顶点之间关系的联系紧密性;介数是一个重要的全局几何量。顶点 u 的介数含义为网络中所有的最短路径之中,经过 u 的数量。它反映了顶点 u(即网络中有关联的个体)的影响力。无标度网络的特征主要集中反映了集聚的集中性。

①吴彤.复杂网络研究及其意义[M].哲学研究,2004(8):59.

二、描述复杂网络的基本参数

近年来，人们在刻画复杂网络结构的统计特性上提出了许多概念和方法，其中有三个基本的概念：平均路径长度（average path length）、聚类系数（clustering coefficient）和度分布（degree distribution）。实际上，瓦茨和斯特罗盖茨提出小世界网络模型的初衷，就是想建立一个既具有类似于随机图的较小的平均路径长度，又具有类似于规则网络的较大的聚类系数的网络模型。另一方面，巴拉巴斯和阿尔伯特提出的无标度网络模型，则是基于许多实际网络的度分布具有幂律（power-law）形式的事实。下面我们根据汪小凡等人的文献对描述复杂网络的三个基本参数进行定义。①

在介绍基本参数之前，我们来先介绍几个刻画网络的概念：节点、边、向、权。一个具体网络，可能错综复杂，但我们都把它抽象为一个由节点的集合 V 和边的集 E 组成的图 $G=(V,E)$。具体事物的个体用节点代表，而个体之间的联系则用边来代表。节点数记为 $N=|V|$，边数记为 $M=|E|$。E 中每条边都有 V 中一对点与之相对应。如果任意点对 (i,j) 与 (j,i) 对应同一条边，则该网络称为无向网络（undirected network），否则称为有向网络（directed network）。如果给每条边都赋予相应的权值，那么该网络就称为加权网络（weighted network），否则称为无权网络（unweighted network）。当然，无权网络也可看作是每条边的权值都为 1 的等权网络。此外，一个网络中还可能包含多种不同类型的节点。例如，在社会关系网络中可以用权表示两个人的熟悉程度，而不同类型的节点可以代表具有不同国籍、地区、年龄、性别和收入的人。图 6.2 给出了几个不同类型的网络的例子。

（一）平均路径长度

网络中两个节点 i 和 j 之间的距离 d_{ij} 定义为连接这两个节点

①汪小凡，等. 复杂网络理论与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2006：9-14.

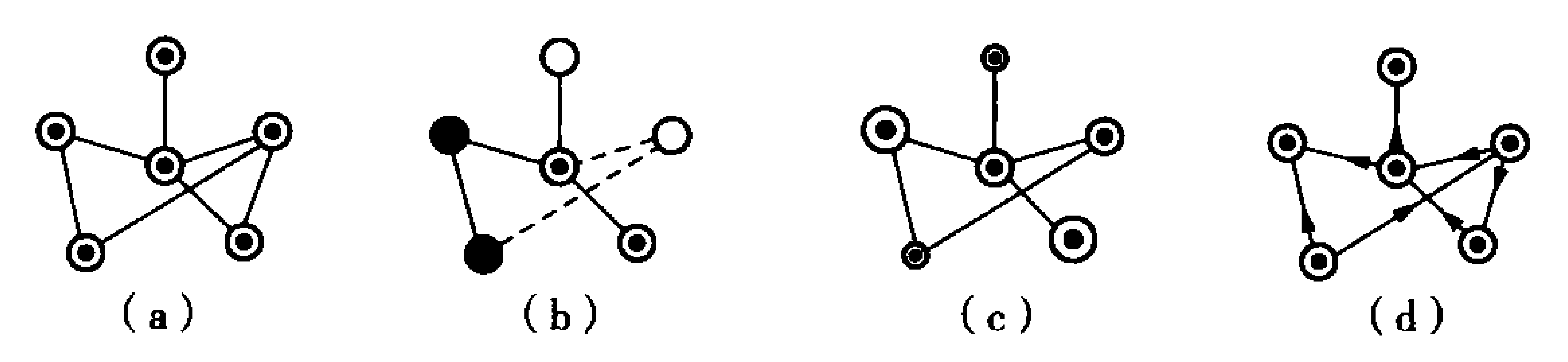


图 6.2 不同类型网络的例子

(a)单一类型节点和边的无向网络；(b)不同类型节点和边的无向网络；
(c)节点和边权重变化的无向网络；(d)有向网络

的最短路径上的边数。网络中任意两个节点之间的距离的最大值称为网络的直径(diameter)，记为 D，即

$$D=\min_{i,j} d_{ij}$$

网络的平均路径长度 L 定义为任意两个节点之间的距离的平均值，即

$$L=\frac{1}{\frac{1}{2}N(N+1)}\sum_{i\geq j} d_{ij}$$

其中 N 为网络节点数。网络的平均路径长度也称为网络的特征路径长度(characteristic path length)。为了便于数学处理，在上述公式中包含了节点到自身的距离(当然该距离为零)。如果不考虑节点到自身的距离，那么要在公式的右端乘以因子 $(N+1)/(N-1)$。在实际应用中，这么小的差别是完全可以忽略不计的。一个含有 N 个节点和 M 条边的网络的平均路径长度可以用时间量级为 $O(MN)$ 的广度优先搜索算法来确定。①

例如，对于图 6.3 所示的一个包含 5 个节点和 5 条边的网络，我们有 $D=d_{45}=3$，$L=1.6$。在朋友关系网络中，L 是连接网络内两个人之间最短关系链中的朋友的平均个数。近期研究发现，尽管许多实际的复杂网络的节点数巨大，网络的平均路径长度却小得惊人。具体地说，一个网络称为是具有小世界效应的，如果对于固定的网络节点平均度 $\langle k\rangle$，平均路径长度 L 的增加速度至多与网络规模 N 的对数成正比。

①汪小凡，等. 复杂网络理论与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2006：10.

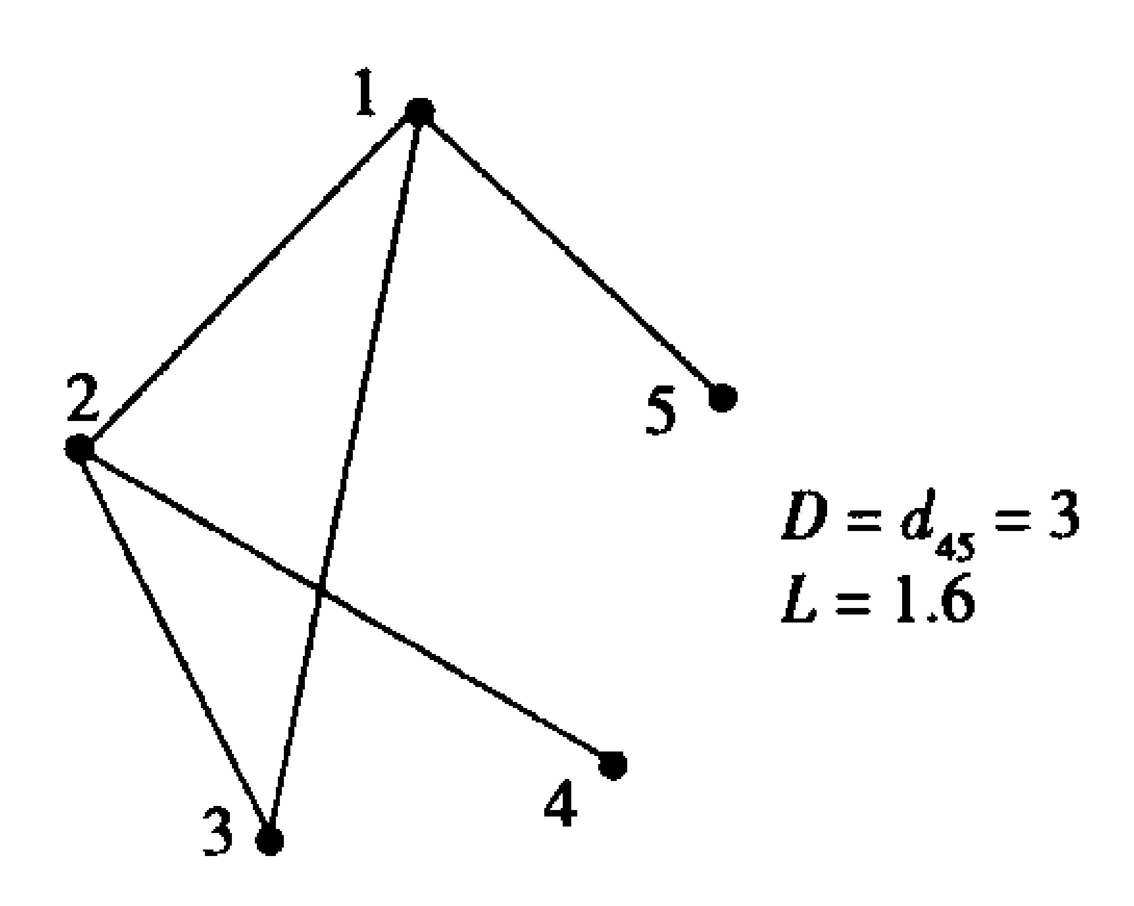


图 6.3　一个简单网络的直径和平均路径长度

(二)聚类系数

在你的朋友关系网络中，你的两个朋友很可能彼此也是朋友，这种属性称为网络的聚类特性。一般地，假设网络中的一个节点 i 有 k_i 条边将它和其他节点相连，这 k_i 个节点就称为节点 i 的邻居。显然，在这 k_i 个节点之间最多可能有 $k_i(k_i-1)/2$ 条边。而这 k_i 个节点之间实际存在的边数 E_i 和总的可能的边数 $k_i(k_i-1)/2$ 之比就定义为节点 i 的聚类系数 C，即

$$C_i=\frac{2E_i}{[k_i(k_i-1)]}$$

从几何特点看，上式的一个等价定义为

$$C_i=\frac{\text{与点 } i \text{ 相连的三角形的数量}}{\text{与点 } i \text{ 相连的三元组的数量}}$$

其中，与节点 i 相连的三元组是指包括节点 i 的三个节点，并且至少存在从节点 i 到其他两个节点的两条边(图 6.4)。①

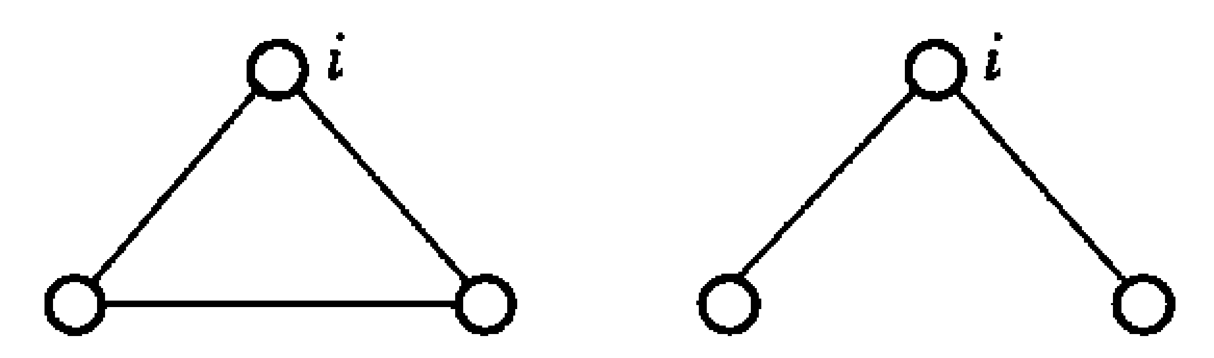


图 6.4　以节点 i 为顶点之一的三元组的两种可能形式

整个网络的聚类系数 C 就是所有节点 i 的聚类系数 C_i 的平均值。很明显，

$0\leqslant C\leqslant 1$。$C=0$ 当且仅当所有的节点均为孤立节点，即没有任

①汪小凡，等. 复杂网络理论与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2006：11.

何连接边；$C=1$ 当且仅当网络是全局耦合的，即网络中任意两个节点都直接相连。对于一个含有 N 个节点的完全随机的网络，当 N 很大时，$C=0(N^{-1})$。而许多大规模的实际网络都具有明显的聚类效应，它们的聚类系数尽管远小于 1 但却比 $O(N^{-1})$ 要大得多。事实上，在很多类型的网络（如社会关系网络）中，你的朋友的朋友同时也是你的朋友的概率会随着网络规模的增加而趋向于某个非零常数，即当 $N\to\infty$ 时，$C=0(1)$。这意味着这些实际的复杂网络并不是完全随机的，而是在某种程度上具有类似于社会关系网络中"物以类聚，人以群分"的特性。

（三）度与度分布

度（degree）是单独节点的属性中简单而又重要的概念。[①] 节点 i 的度是 k_i 定义为与该节点连接的其他节点的数目。有向网络中一个节点的度分为出度（out-degree）和入度（in-degree）。节点的出度是指从该节点指向其他节点的边的数目，节点的入度是指从其他节点指向该节点的边的数目。直观上看，一个节点的度越大就意味着这个节点在某种意义上越"重要"。网络中所有节点 i 的度 k_i 是 i 的平均值，称为网络的（节点）平均度，记为 $\langle k\rangle$。网络中节点的度的分布情况可用分布函数 $P(k)$ 来描述。$P(k)$ 表示的是一个随机选定的节点的度恰好为 k 的概率。规则的格子有着简单的度序列，因为所有的节点具有相同的度，所以其度分布为 Delta 分布，它是单个尖峰。网络中的任何随机化倾向都将使这个尖峰的形状变宽。完全随机网络的度分布近似为 Poisson 分布（图 6.5a），其形状在远离峰值 $\langle k\rangle$ 处呈指数下降。这意味着当 $k \gg \langle k\rangle$ 时，度为 k 的节点实际上是不存在的。因此，这类网络也称为均匀网络（homogeneous network）。

近年来的大量研究表明，许多实际网络的度分布明显地不同于 Poisson 分布。特别地，许多网络的度分布可以用幂律形式 $P(k)\propto k^{-\gamma}$ 来更好描述（图 6.5b）。幂律分布比 Poisson 分布曲线下

①汪小凡，等．复杂网络理论与应用[M]．北京：清华大学出版社，2006：11．

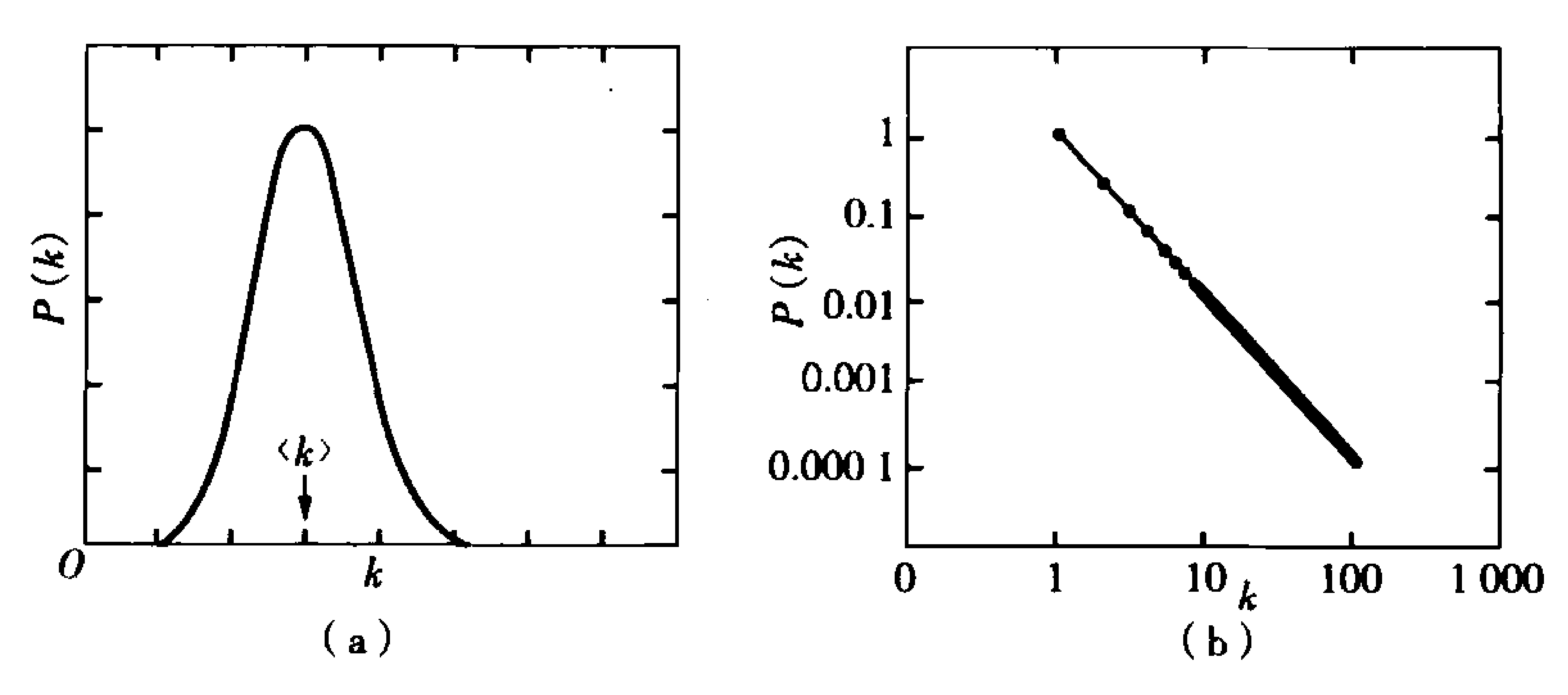
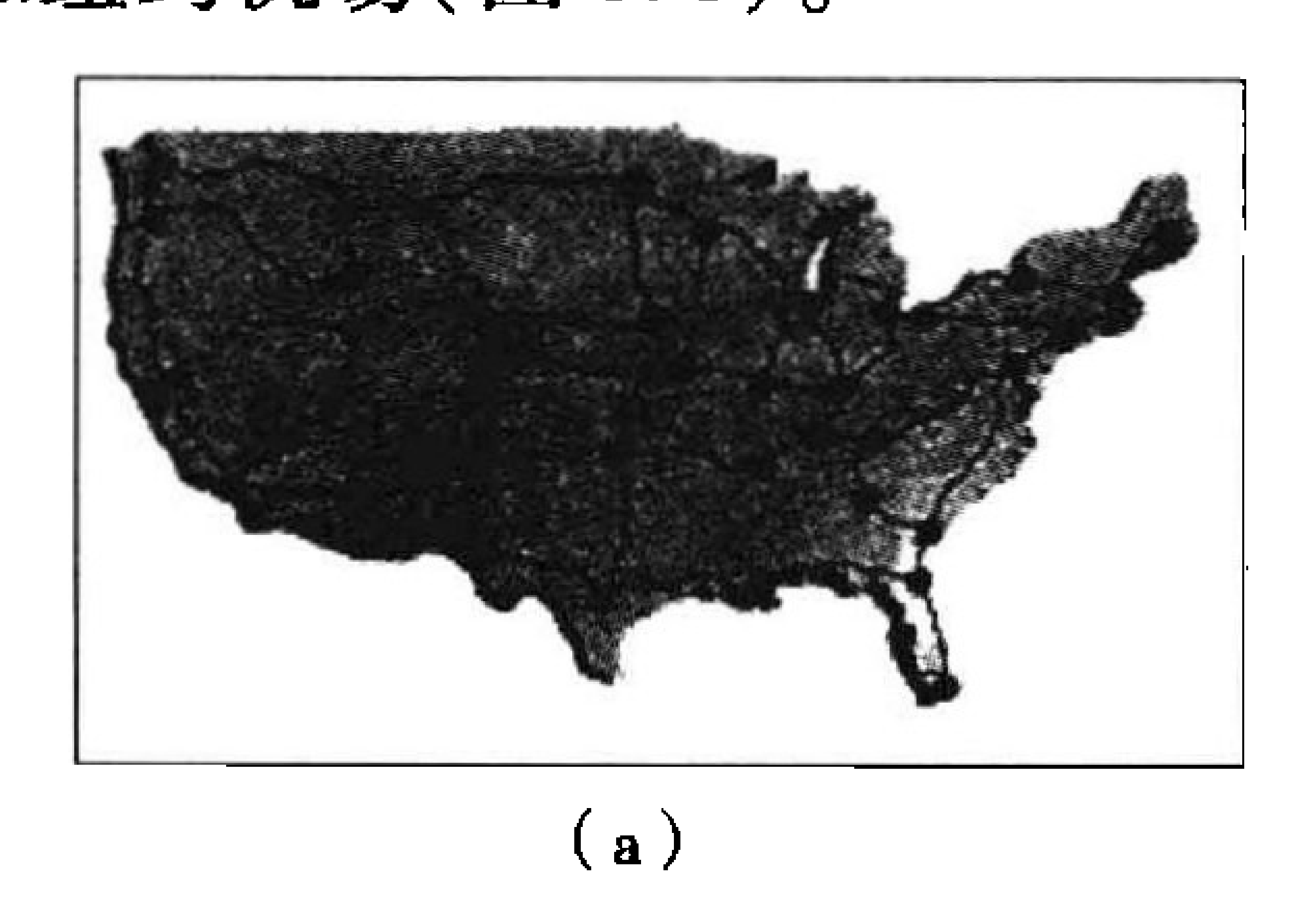


图6.5 两种分布的对比

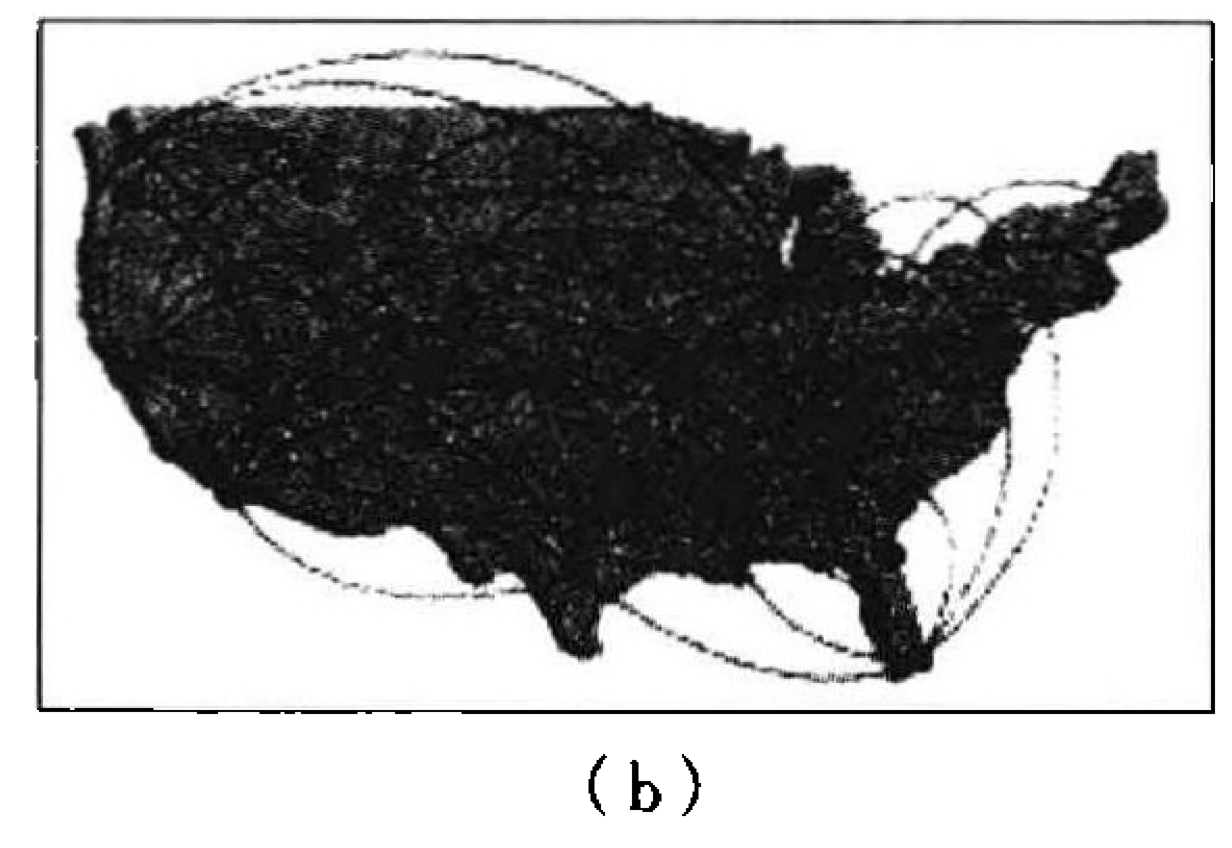
(a)Paisson分布;(b)幂律分布(对数坐标系)

降要缓慢得多。幂律分布也称为无标度分布,具有幂律分布的网络也称为无标度网络。

在一个度分布为具有适当幂指数(通常为$2 \leq \gamma \leq 3$)的幂律形式的大规模无标度网络中,绝大部分的节点的度相对很低,但存在少量的度相对很高的节点。因此,这类网络也称为非均匀网络(inhomogeneous network),而那些度相对很高的节点称为网络的"集线器(hub)"。例如,美国高速公路网就可近似看作是一个均匀网络,因为不可能有上百条高速公路都经过同一个城市;而美国航空网则可看作是一个无标度网络,大部分机场都是小机场,但却存在少量连接众多小机场的非常大的机场,如芝加哥、达拉斯、亚特兰大和纽约机场(图6.6)。①



(a)



(b)

图6.6 随机网络与无标度网络的对比

(a)随机网络例子:美国高速公路网简化图;(b)无标度网络例子:美国航空网简化图

①汪小凡,等.复杂网络理论与应用[M].北京:清华大学出版社,2006:12-13.

(四)介数

上述三个参数是刻画复杂网络最重要的三个参数,一般网络都由这三个参数来描述。有时,复杂网络研究者还可以引入介数(betweenness centrality)这一参数来衡量复杂网络拓扑特性,以便更加详细刻画复杂网络的特征。一个节点的介数被定义为网络中所有的最短路径中经过该节点的数量比例,它衡量了通过网络中该节点的最短路径的数目。①

对于复杂网络,节点 k 的介数 g_k 计算公式如下:

$$g_k = \sum_{i \neq j} g_k(i,j) = \sum_{i \neq j} \frac{C_k(i,j)}{C(i,j)}$$

其中 $C_k(i,j)$ 表示节点 i 和 j 之间最短路径中经过节点 k 的数目,$C(i,j)$ 则表示节点 i 和 j 之间最短路径的总数目。介数反映了相应的节点在整个网络中的作用和影响力,具有很强的现实意义。例如,社会学中常用这个指标描述指定人在社会中的影响,解释为其在社会关系中起作用的分量。在社会关系网络或技术网络中,介数的分布特征反映了不同人员、资源和技术在相应生产关系中的地位,这对于在网络中发现和保护关键资源和技术具有重要意义。

在瓦茨和斯特罗盖茨关于复杂网络的小世界现象的研究,以及巴拉巴斯和阿尔伯特关于复杂网络的无标度特征的工作之后,人们对来自不同领域的大量实际网络的拓扑特征进行了广泛的实证性研究,表 6.2 列出了部分结果。测量的参数包括:有向或无向、节点总数 N、边的总数 M、平均度数 $\langle k \rangle$、平均路径长度 L、聚类系数 C。如果符合幂律,则给出幂指数 γ(对于有向网络,则分别给出入度指数和出度指数);否则为“—”。表中的空格表示没有可靠的数据。②

①刘涛,等. 复杂网络理论及其应用研究概述[J]. 系统工程,2005(6):2.

②汪小凡,等. 复杂网络理论与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006:14.

表 6.2 各种实际网络的基本统计数据

网络		类型	N	M	$\langle k \rangle$	L	γ	C
社会领域	电影演员	无向	449 913	25 516 482	113	3.48	2.3	0.78
	公司董事	无向	7 673	55 392	14.4	4.6	—	0.88
	数学家合作	无向	253 339	496 489	3.92	7.57	—	0.34
	合作物理学家	无向	52 909	245 300	9.27	6.19	—	0.56
	合作生物学家	无向	1 520 251	11 803 064	15.5	4.92	—	0.6
	电话呼叫图	无向	47 000 000	8 000 000	3.16	—	—	—
	电子邮件	有向	59 912	86 300	1.44	4.95	1.5/2.0	0.16
	电子邮件地址	有向	16 881	57 029	3.38	5.22	—	0.13
	学生关系	无向	573	477	1.66	16	—	0
	性关系	无向	2 810	—	—	—	3.2	—
信息领域	WWW(nd.edu)	有向	269 504	1 497 135	5.55	11.3	2.1/2.4	0.29
	WWW(Altavista)	有向	203 549 046	2.13E+09	10.5	16.2	2.1/2.7	
	引用网络	有向	783 339	6 716 198	8.57	—	3.0/—	—
	罗氏词典	有向	1 022	5 103	4.99	4.87	—	0.15
	单词搭配网络	无向	460 902	1.7E+07	70.1	—	2.7	0.44
技术领域	自治层 Internet	无向	10 697	31 992	5.98	3.31	2.5	0.39
	电力网	无向	4 941	6 594	2.67	19	—	0.08
	铁路网	无向	587	19 603	66.8	2.16	—	0.69
	软件包	有向	1 439	1 723	1.2	2.42	1.6/1.4	0.08
	软件类	有向	1 377	2 213	1.61	1.51	—	0.01
	电子电路	无向	24 097	53 248	4.34	11.1	3	0.03
	对等网络	无向	880	1 296	1.47	4.28	2.1	0.01
生物领域	代谢网络	无向	765	3 686	9.64	2.56	2.2	0.67
	蛋白质网络	无向	2 115	2 240	2.12	6.8	2.4	0.07
	海洋食物网	有向	135	598	4.43	2.05	—	0.23
	淡水食物网	有向	92	997	10.8	1.9	—	0.09
	神经网络	有向	307	2 359	7.68	3.97	—	0.28

三、复杂网络的基本模型

要理解网络结构与网络行为之间的关系，并进而考虑改善网络的行为，就需要对实际网络的结构特征有很好的了解，并在此基础上建立合适的网络结构模型。在瓦茨和斯特罗盖茨关于小世界

网络,以及巴拉巴斯和阿尔伯特关于无标度网络的开创性工作之后,人们对存在于不同领域的大量实际网络的拓扑特征进行了广泛的实证性研究。

最简单的网络模型为规则网络,所谓规则网络是完全按照确定性的规则来连接节点的网络,其特点是每个节点的近邻数目都相同。例如一维链、二维晶格、完全图等规则网络,全局耦合网、最邻近耦合网和星形网络也都是规则网络。①

与完全规则网络相反的是完全随机网络,其中一个典型的模型是20世纪50年代末艾多思(Erdos)和任伊(Renyi)研究的ER完全随机网络模型。随机网络是节点之间以某种概率 p 相连接,也就是说,有 N 个点,就会有约 $pN(N-1)/2$ 条边相连。

实证结果表明,规则网络具有聚集性,但平均最短路径却较大;随机图则正好相反,具有小世界性,但聚集系数却相当小。无论是规则网络还是随机网络模型都不能再现真实网络的一些重要特征,毕竟大部分实际网络既不是完全规则的,也不是完全随机的。大多数的真实网络具有小世界性(较小的最短路径)和聚集性(相对较大的聚集系数)。例如,在现实生活中,人们通常认识他们的邻居和同事,但也有可能有少量远在异国他乡的朋友。而万维网上的网页也绝不是像ER随机图那样完全随机地连接在一起的。以下的小世界网络和无标度网络更能反映实际网络的有关特性,是复杂网络的两个代表性模型。

(一)小世界网络模型(Small-works world net)

规则网络和随机网络不能很好展现真实网络的性质,这说明现实世界既不是完全确定的也不是完全随机的。瓦茨和斯特罗盖茨在1998年提出了一个兼具小世界性和高聚集性的网络模型,它是复杂网络研究中的重大突破。他们通过将规则网络中的每条边以概率 p 随机连接到网络中的一个新节点上,构造出一种介于规则网络和随机网络之间的网络(简称WS网络),它同时具有较小的

①刘涛,等.复杂网络理论及其应用研究概述[J].系统工程,2005(6):2-4.

平均路径长度和较大的聚集系数，而规则网络和随机网络则分别是 WS 网络在 p 为 0 和 1 时的特例。

WS 小世界模型构造过程如下(图 6.7a)：[1]

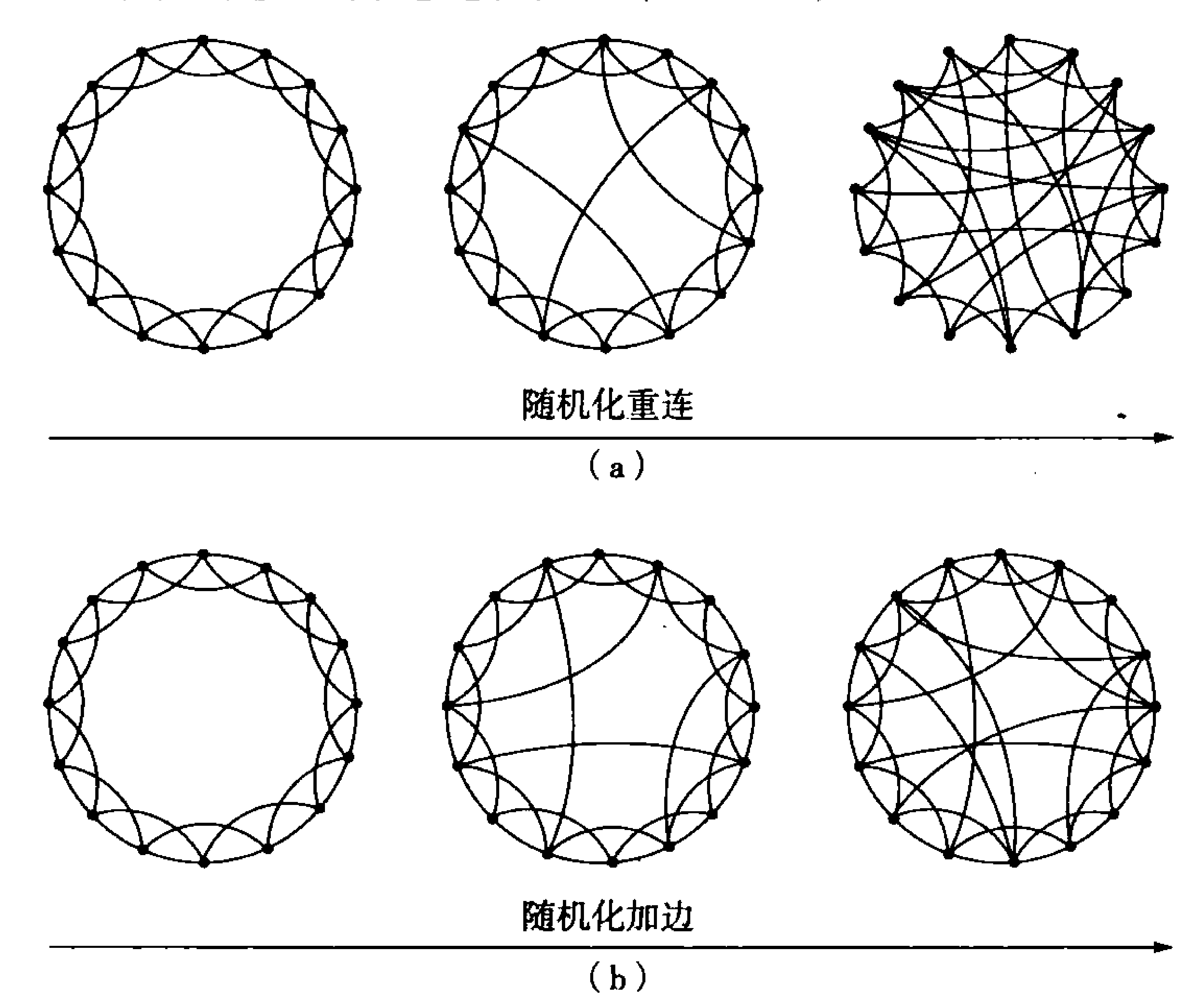


图 6.7 小世界网络模型

(a) WS 小世界模型；(b) NW 小世界模型

(1)从规则图开始：考虑一个含有 N 个点的最近邻耦合网络，它们围成一个环，其中每个节点都与它左右相邻的各 $K/2$ 节点相连，K 是偶数。

(2)随机化重连：以概率 p 随机地重新连接网络中的每个边，即将边的一个端点保持不变，而另一个端点取为网络中随机选择的一个节点。其中规定，任意两个不同的节点之间至多只能有一条边，并且每一个节，都不能有边与自身相连。

由上述算法得到的网络模型的聚类系数 $C(p)$ 和平均路径长度 $L(p)$ 的特性，都可看作是重连概率 p 的函数。图 6.8[2] 显示了网

①汪小凡，等. 复杂网络理论与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2006：21.

②R. Albert & A. Barabasi. Statistical Mechanics of Complex Networks[J]. Reviews of Modern Physics, Vol 74, Jan. 2002.

络的聚类系数和平均路径长度随重连概率 p 的变化关系(图中对两个值作了归一化处理)。一个完全规则的最近邻耦合网络(对应于 $p=0$)是高度聚类的[$C(0)\approx 3/4$]但平均路径长度很大[$L(0)\approx N/2K\gg 1$]。当 p 较小时($0<p\ll 1$),重新连线后得到的网络与原始的规则网络的局部属性差别不大,从而网络的聚类系数变化也不大[$C(p)\propto C(0)$],但其平均路径长度却下降很快[$L(p)\ll L(0)$]。这类既具有较短的平均路径长度又具有较高的聚类系数的网络就称为小世界网络。

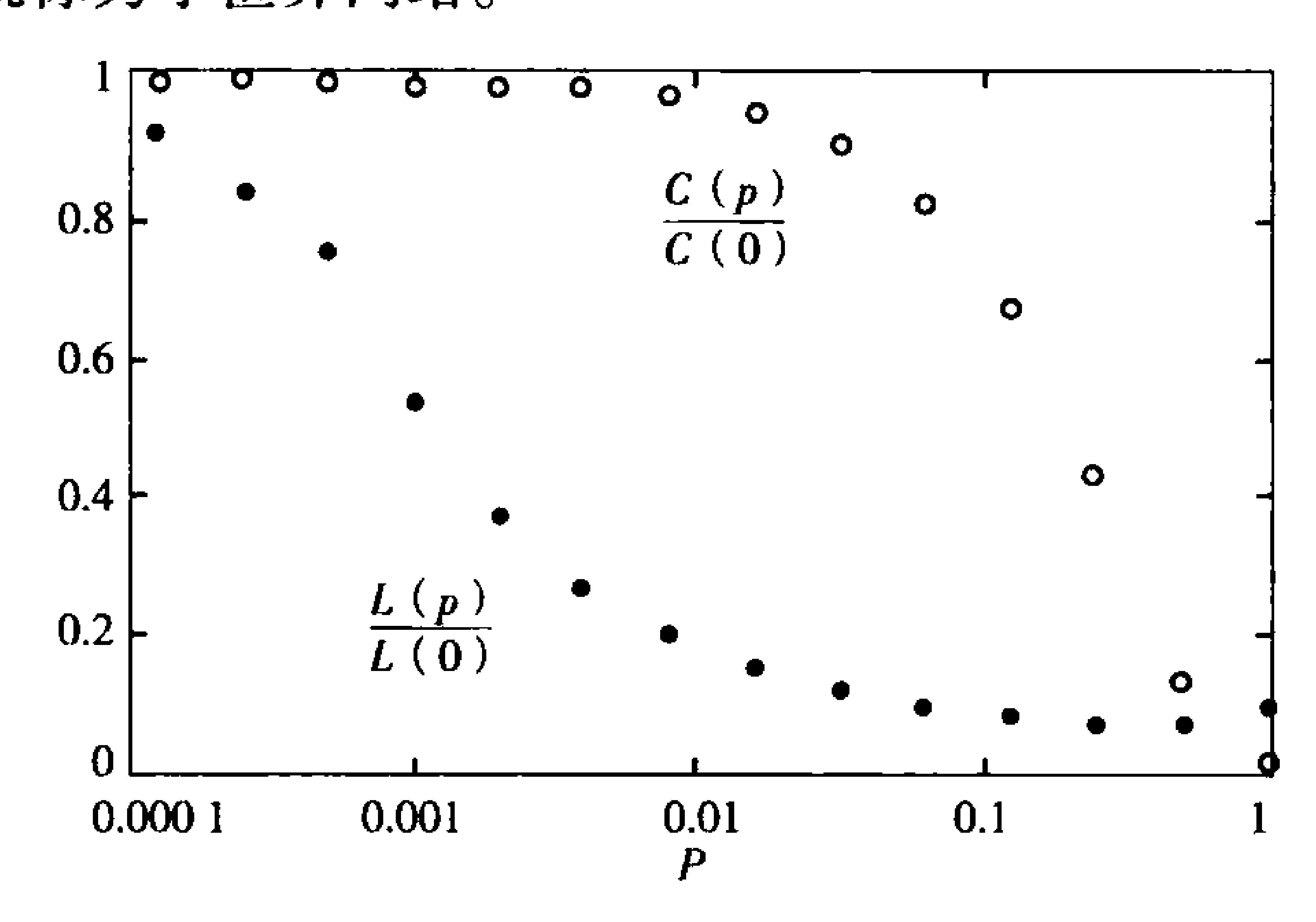


图 6.8 WS 小世界模型的聚类系数和平均路径长度随重连概率 p 的变化关系

WS 模型提出后,很多学者在此基础上作了进一步改进,其中应用最多的是纽曼(Newman)和瓦茨(Watts)提出的所谓 NW 小世界模型。NW 模型不同于 WS 模型之处在于它不切断规则网络中的原始边,而是以概率 p 重新连接一对节点。NW 模型的优点在于其简化了理论分析,因为 WS 模型可能存在孤立节点,但 NW 不会。该模型是通过用"随机化加边"取代 WS 小世界模型构造中的"随机化重连"而得到的(图 6.7b)。事实上,当 p 很小而 N 很大的时候,这两个模型理论分析的结果是相同的,现在我们统称它们为小世界模型。

小世界网络模型反映了朋友关系网络的一种特性,即大部分的人的朋友都是和他们住在同一条街上的邻居或在同一单位工作的同事。另一方面,也有些人是住得较远的,甚至是远在异国他乡

的朋友,这种情形对应于 WS 小世界模型中通过重新连线或在 NW 小世界模型中通过加入连线产生的远程连接。

(二)无标度网络模型(Scale-free networks)

尽管小世界模型能很好地刻画现实世界的小世界性和高聚集性,但对小世界模型的理论分析表明其节点的度分布仍为指数分布形式。ER 随机图和 WS 小世界模型的一个共同特征就是网络的连接度分布可近似用 Poisson 分布来表示,该分布在度平均值$\langle k\rangle$处有一峰值,然后呈指数快速衰减。这意味着当 $k\geqslant\langle k\rangle$时,度为 k 的节点几乎不存在。因此,这类网络也称为均匀网络或指数网络(exponential network)。实证结果却表明对于大多数大规模真实网络用幂率分布来描述它们的度分布更加精确。

近年在复杂网络研究上的另一重大发现就是许多复杂网络,包括因特网、万维网以及新陈代谢网络等的连接度分布函数具有幂律形式。由于这类网络的节点的连接度没有明显的特征长度,故称为无标度网络。幂率分布相对于指数分布其图形没有峰值,大多数节点仅有少量连接,而少数节点拥有大量连接,不存在随机网络中的特征标度,于是巴拉巴斯等人称这种度分布具有幂率特征的网络为无标度网络。为解释无标度网络的形成机制,巴拉巴斯和阿尔伯特提出了著名的 BA 模型,他们认为以前的网络模型没有考虑真实网络的两个重要性质——增长性和择优连接性,前者意味着网络中不断有新的节点加入进来,后者则意味着新的节点进来后优先选择网络中度数大的节点进行连接。他们不仅给出了 BA 模型的生成算法并进行了模拟分析,而且还利用统计物理中的平均场方法给出了模型的解析解,结果表明:经过充分长时间的演化后,BA 网络的度分布不再随时间变化,度分布稳定为指数为 3 的幂律分布。

为了解释幂律分布的产生机理,巴拉巴斯和阿尔伯特提出了一个无标度网络模型,现被称为 BA 模型。他们认为以前的许多网

络模型都没有考虑到实际网络的如下两个重要特性:①

(1)增长(growth)特性:即网络的规模是不断扩大的。例如每个月都会有大量的新的科研文章发表,而万维网上则每天都有大量新的网页产生。

(2)优先连接(preferential attachment)特性:即新的节点更倾向于与那些具有较高连接度的"大"节点相连接。这种现象也称为"富者更富(rich get richer)"或"马太效应(Matthew effect)"。例如,新发表的文章更倾向于引用一些已被广泛引用的重要文献,新的个人主页上的超文本链接更有可能指向新浪、雅虎等著名的站点。

基于网络的增长和优先连接特性,BA 无标度网络模型的构造算法如下:②

(1)增长:从一个具有 m_0 个节点的网络开始,每次引入一个新的节点,并且连到 m 个已存在的节点上,这里 $m \leqslant m_0$。

(2)优先连接:一个新节点与一个已经存在的节点 i 相连接的概率 Π_i 与节点 i 的度 k_i、节点 j 的度 k_j 之间满足如下关系:

$$\Pi_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$$

在经过 t 步后,这种算法产生一个有 $N=t+m_0$ 个节点、mt 条边的网络。图 6.9 显示了当 $m=m_0=2$ 时的 BA 网络的演化过程。初始网络有两个节点,每次新增加的一个节点按优先连接机制与网络中已存在的两个节点相连。

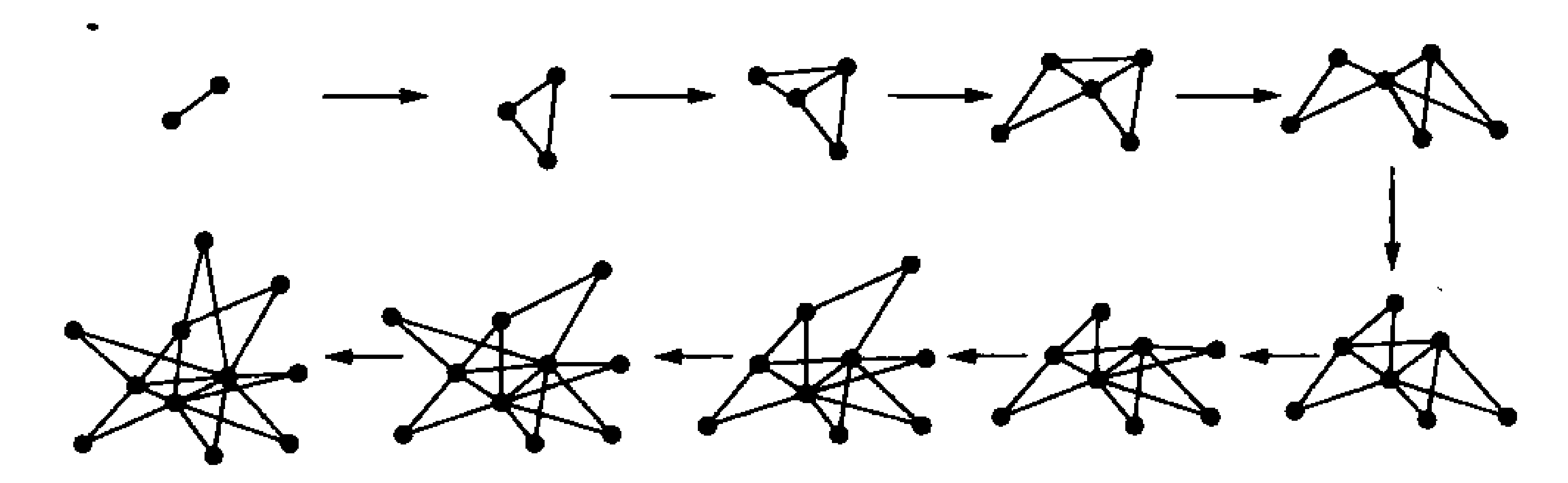


图 6.9 BA 无标度网络的演化($m=m_0=2$)

①汪小凡,等.复杂网络理论与应用[M].北京:清华大学出版社,2006:27.

②汪小凡,等.复杂网络理论与应用[M].北京:清华大学出版社,2006:28.

BA 模型的提出是复杂网络研究中的又一重大突破，标志着人们对客观网络世界认识的深入。之后，许多学者对这一模型进行了改进，如非线性择优连接、加速增长、重绕边的局域事件、逐渐老化、适应性竞争等。需要注意的是，绝大多数而不是所有的真实网络都是无标度网络，如有的真实网络度分布为指数分布截断形式等等。

（三）其他网络模型

除了经典的小世界模型、无标度网络模型之外，学者们也提出了一些其他的网络模型来描述真实世界的网络结构。

（1）局域世界演化模型。汪小帆、李翔和陈关荣认为择优连接机制不可能在整个网络上都起作用而只会在某个局域世界里被遵守，通过将局域世界的概念引入 BA 模型对其作了推广，提出了所谓的局域世界演化网络模型，其度分布介于指数网络和无标度网络的度分布之间。[①] 该模型表明，随着局域世界的扩大，网络演化越不均匀，越接近于 BA 模型，即局域世界的规模决定了网络演化的非均匀性。

（2）权重演化网络模型。上述研究均将网络看作无权网，然而现实网络大多为有权网，即网络节点之间的连接强度是有区别的。约克（Yook）等人提出了一种权重演化模型：假定节点权重正比于节点的度数，也即度数大的节点拥有更大的权数。结果表明，其度分布也符合幂律特征。

（3）确定性网络模型。上述所有网络模型都引入了某种程度的随机性，那么是否一定要有随机性才能展现出小世界性和无标度特性呢？巴拉巴斯等人提出了一种具有层次结构的网络模型，它在确定性机制下也能表现出无标度特性。

四、复杂网络的基本特征

科学家发现绝大多数实际的复杂网络都具有如下几个基本特征。[②]

①汪小凡，等．复杂网络理论与应用[M]．北京：清华大学出版社，2006：34-36.

②吴彤．复杂网络研究及其意义[M]．哲学研究，2004(8)：60.

①网络行为的统计性：网络节点数可以有成百上千万，甚至更多，从而使得大规模性的网络行为具有统计特征。②节点动力学行为的复杂性：各个节点本身可以是各非线性系统具有分岔和混沌等非线性动力学行为。③网络连接的稀疏性：一个 N 个节点的具有全局耦合结构的网络的连接数目为 $O(N^2)$，而实际大型网络的连接数目通常为 $O(N)$。④连接结构的复杂性：网络连接结构既非完全规则也非完全随机。⑤网络的时空演化复杂性：复杂网络具有空间和时间的演化复杂性，展示出丰富的复杂行为，特别是网络节点之间的不同类型的同步化运动[包括出现周期、非周期(混沌)和阵发行为等运动]。

以上五种特征，反映了实际网络的复杂性特征。①它具有无序演化的特征；②它也具有增加有序程度的演化特征；③它具有分形和混沌的特征；④它具有自组织演化的特征；⑤它具有形成序参量的特征。因此，复杂网络的研究可能会综合以往的各种自组织理论、非线性和复杂性理论研究的成果，从而形成新的复杂性研究机制的理论。

复杂网络具有很多与规则网络和随机网络不同的统计特征①，其中最重要的是小世界效应(small-world effect)和无标度特性(scale-free property)。

(一)小世界效应

我们已经知道，在网络中，两点间的距离被定义为连接两点的最短路所包含的边的数目，把所有节点对的距离求平均，就得到了网络的平均距离(average distance)。另外一个叫做聚类系数(clustering coefficient)的参数，专门用来衡量网络节点聚类的情况。比如在朋友关系网中，你朋友的朋友很可能也是你的朋友；你的两个朋友很可能彼此也是朋友。聚类系数就是用来度量网络的这种性质的。用数学化的语言来说，对于某个节点，它的聚类系数被定义为它所有相邻节点之间连边的数目占可能的最大连边数目的比

①周涛，等.复杂网络研究概述[J].物理，2005(1)：32.

例，网络的聚类系数 C 则是所有节点聚类系数的平均值。研究表明，规则网络具有大的聚类系数和大的平均距离，随机网络具有小的聚类系数和小的平均距离。1998 年，瓦茨和斯特罗盖茨通过以某个很小的概率 p 切断规则网络中原始的边，并随机选择新的端点重新连接，构造出了一种介于规则网络和随机网络之间的网络（WS 网络），它同时具有大的聚类系数和小的平均距离，因此既不能当作规则网络处理，也不能被看作是随机网络。随后，纽曼和瓦茨给出了一种新的网络的构造方法，在他们的网络（NW 网络）中，原有的连边并不会被破坏，平均距离的缩短源于以一个很小的概率在原来的规则网络上添加新的连边。后来物理学家把大的聚类系数和小的平均距离两个统计特征合在一起称为小世界效应，具有这种效应的网络就是小世界网络（图 6.10）。[①]

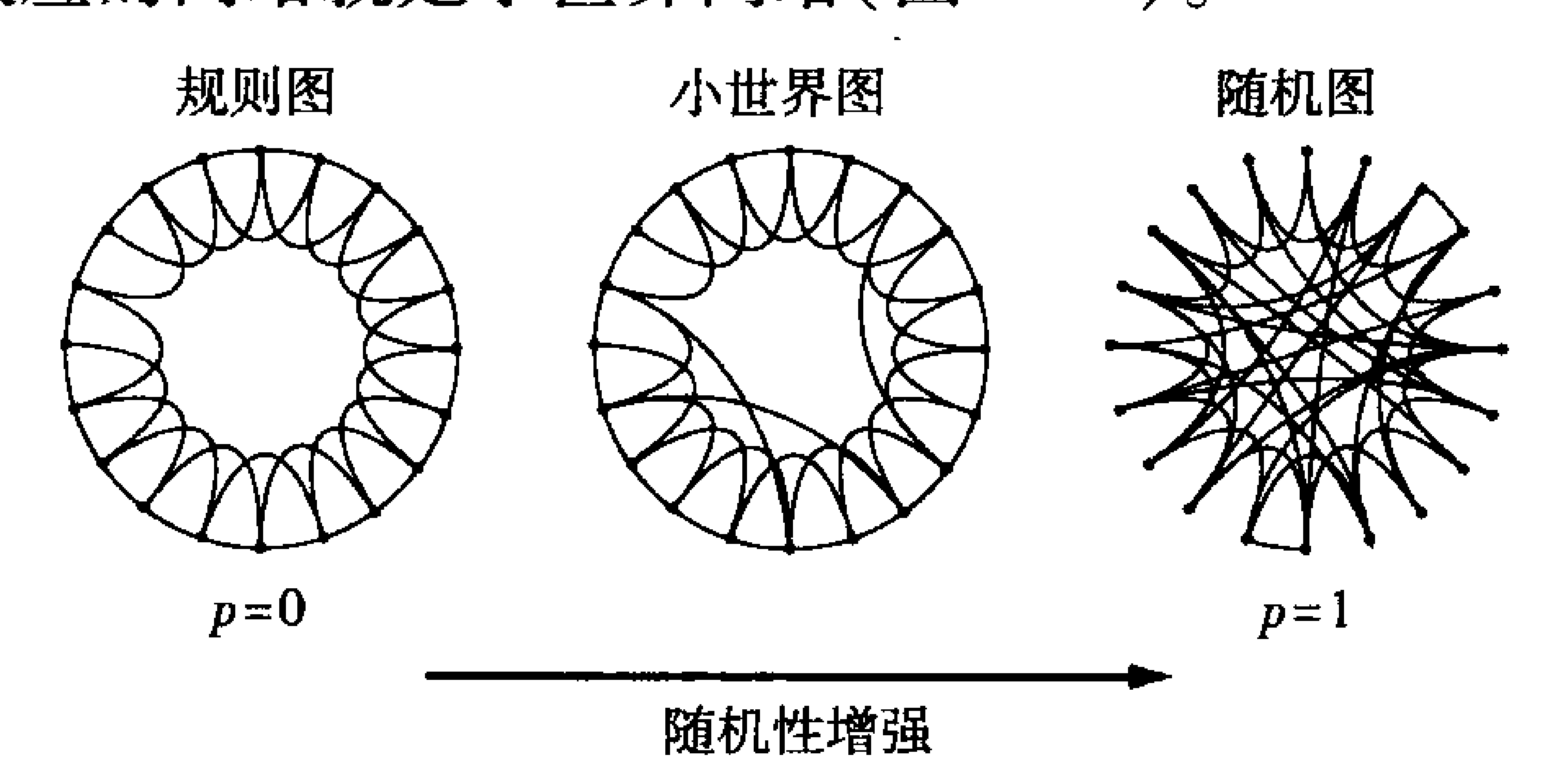


图 6.10 小世界网络拓扑结构示意图（左边的网络是规则的，右边的网络是随机的，中间的网络是在规则网络上加上一点随机的因素而形成的小世界网络，它同时具有大的聚类系数和小的平均距离）

（二）无标度特性

大量的实验研究表明[②]，真实网络几乎都具有小世界效应，同时科学家还发现大量真实网络的节点度服从幂率分布，这里某节点的度是指该节点拥有相邻节点的数目，或者说与该节点关联的边的数目。节点度服从幂律分布就是说，具有某个特定度的节点

①R. Albert & A. Barabasi. Statistical Mechanics of Complex Networks [J]. Reviews of Modern Physics, Vol 74, Jan. 2002.

②周涛，等. 复杂网络研究概述[J]. 物理，2005(1)：31-35.

数目与这个特定的度之间的关系可以用一个幂函数近似地表示。幂函数曲线是一条下降相对缓慢的曲线,这使得度很大的节点可以在网络中存在。对于随机网络和规则网络,度分布区间非常狭窄,几乎找不到偏离节点度均值较大的点,故其平均度可以被看作是其节点度的一个特征标度。在这个意义上,我们把节点度服从幂律分布的网络叫做无标度网络(scale-free networks),并称这种节点度的幂律分布为网络的无标度特性(图 6.11)。① 1999 年巴拉巴斯和阿尔伯特给出了构造无标度网络的演化模型,他们所用的方法与普赖斯(Price)的方法类似。巴拉巴斯和阿尔伯特把真实系统通过自组织生成无标度的网络归功于两个主要因素:生长和优先连接,而他们的网络模型(BA 网络)正是模拟这两个关键机制设计的。除了小世界效应和无标度特性外,真实网络还有很多统计上的特征,例如,混合模式特性,度相关特性,超小世界性质等。

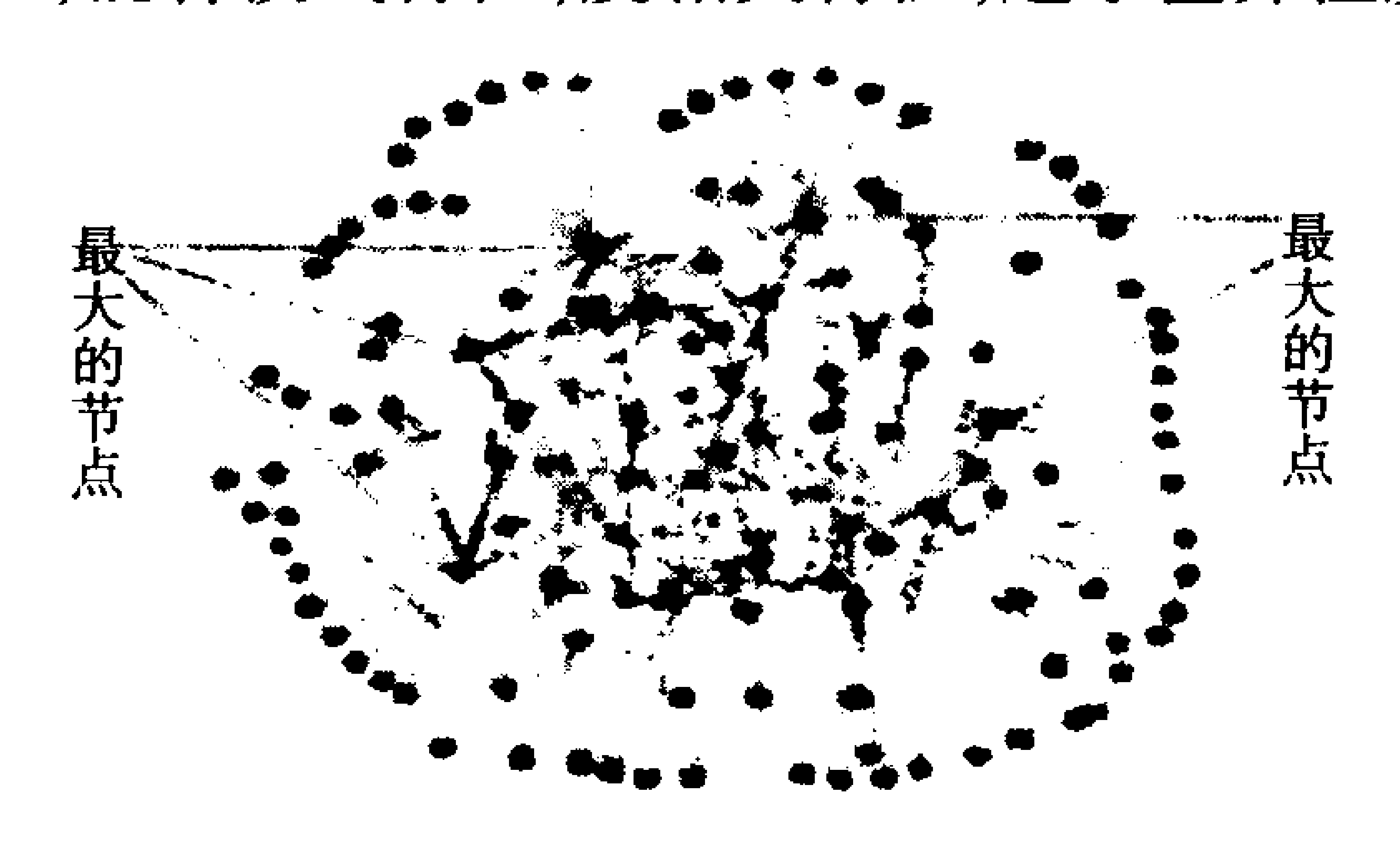


图 6.11 无标度网络的拓扑结构示意图(本图展示了有 130 个节点的 BA 网络,其节点度服从幂指数为 -3 的幂律分布。图中标注的 5 个节点是网络中度最大的 5 个节点)

第三节 复杂系统的复杂网络方法

系统结构是系统存在的基本方式,是系统功能的载体。早年的系统论已经对系统、结构、功能之间的关系做过诸多的探索。但

①吴彤. 复杂网络研究及其意义[M]. 哲学研究,2004(8):60.

是,对复杂系统而言,系统论的分析方法难于奏效。随着复杂网络理论的兴起,系统结构问题又引起了学者们的广泛关注。复杂网络理论从统计视角对由千千万万要素构成的系统进行结构分析,为我们分析复杂网络的系统结构提供了一种新的科学方法和新工具。

一、复杂网络:复杂系统的结构方式

任何系统的存在都有两个基本的构成要素,一是系统是由什么构成的,即要素问题;二是这些要素具有怎样的时空排列、组合方式,即结构问题。结构问题很早就被人们所关注,如几何学研究的其实就是各种形状关系的学问,实际上就是关注结构问题。物理学、化学、工程学更是离不开结构问题的研究。例如,同样由碳元素组成,但晶体结构不同就形成了高硬度的金刚石和柔软滑腻的石墨,并且它们各有各的外观、密度、熔点等。力学也对结构特别关注,并由此形成了结构力学这样一门专门的学科分支。哲学家也对事物的结构问题进行了认真的思考,并由此形成了结构主义及后现代的解构主义。

从科学层面对结构问题进行全面研究当属20世纪中叶兴起的系统科学。系统科学认为,系统是由组分(要素)和结构(关系)共同构成的,系统的功能与系统的组分及其结构密切相关。系统在组分不变的情况下,为了完成系统整体功能而把系统内相关联的组分与组分之间整合为统一的整体形式,这种关联方式的总和称为系统的结构。系统的结构是系统诸元素之间相互关联、相互作用的总和,它构成了系统内部相对稳定的组织形式和结合方式。① 只要组分之间存在着相互作用,就存在系统结构。系统要素相同,但如果关联形式不同,系统的结构也就不同,其功能也就不同,所以结构研究是系统科学研究的重要内容。

由于缺乏有效的方法工具,传统的科学与哲学所关注的系统结构基本上停留在简单的结构分析上。例如,原子核的结构、分子

①颜泽贤,等.系统科学导论[M].北京:人民出版社,2006:75.

的结构等等,虽然看似复杂,但化学家们基本上对各类物质的化学结构有了充分的了解。马克思主义认为,社会结构由其经济结构、政治结构和文化结构共同构成,而社会的经济结构是由社会的生产关系的总和构成。简单的结构分析基本上都分属于不同的具体学科,除了系统科学和结构主义之外,很少有其他学科关注结构关系的共性特征。一旦遇到复杂的结构,因缺少有效的方法工具,基本上没有引起研究者的关注。

随着科学技术的发展,各种复杂的系统结构不断出现,而且因错综复杂的相互作用而构成复杂的网络。例如全世界的电话网络、电力供应网络、商业销售网络、交通网络,特别是互联网的兴起更引起了人们对复杂系统结构的关注。这些网络的共性是,结构都特别复杂,其功能稳定性及其有效控制问题因与生活息息相关而牵动着人们的神经。这些复杂网络系统看似各不相同,但有两个共同的特点:一是组成系统的组分或者说节点数目巨大,成千上万甚至难于计数;二是组分间存在着复杂的相互作用。正因如此,传统的还原论方法难于应付,难于将复杂的网络系统还原为某些简单的系统或者组分。为此我们要超越还原论,从整体论的观点去发现看上去互不相同的复杂网络之间的共性和处理它们的普适方法。

对复杂网络的研究最早追溯到欧拉对格尼斯堡七桥问题的研究并由此发展出来的数学分支——图论。图论虽属于网络问题,但离现在的复杂网络还有很大的距离,而且也没有发展出处理复杂网络的有效工具。20 世纪 50 年代,艾多思(Erdős)和任伊(Renyi)提出随机图理论,为复杂网络理论的提出做出了重要的准备工作。

复杂网络理论的建立是在20 世纪即将结束的时候,两篇文章、两对师生与此直接相关:一篇是美国康奈尔(Cornell)大学理论与应用力学系博士生瓦茨及其导师、非线性动力学专家斯特罗盖茨教授于 1998 年 6 月在《自然》杂志上发表题为《“小世界”网络的集体动力学》,另一篇是美国圣母(Notre Dame)大学物理系的巴拉巴斯教授及其博士生阿尔伯特于 1999 年 10 月在《科学》杂志上发表的题为《随机网络中标度的涌现》。这两篇文章被认为开创了复杂

网络研究的新纪元，它们分别揭示了复杂网络的小世界和无标度性质，并建立了相应的模型以阐述这些特性的产生机理。

复杂网络理论为什么会在世纪之交的时候取得突破性的进展，主要有三个重要原因：①

（1）计算机技术和国际互联网的迅猛发展，不但构建出巨大的复杂人工网络，而且为研究复杂网络提供了高效的技术工具。

（2）交叉学科的发展为我们提供了各种各样的复杂网络模型和数据，并由此提出了研究复杂网络共性的需求。

（3）复杂性科学的兴起为研究复杂网络理论提供了超越还原论的方法论原则，并促使人们开始从整体上研究网络的结构与性能之间的复杂关系。

复杂网络理论的兴起与发展是系统科学结构理论的继承与发展，是网络时代的系统结构理论。复杂网络理论所揭示的网络结构性质、规律为我们认识复杂系统的结构提供了一种有效的科学方法，是认识现实世界形形色色复杂系统结构的普适科学方法。

二、参数刻画：复杂网络的统计特征

我们已经说过，任何系统都由构成系统的组成元素（或要素）及其结构共同构成。我们可以不考虑元素的具体性质，将它抽象地简化为节点 V，也不考虑要素之间相互联系的具体内容，统一用联系节点之间的直线的边 E 来表示。这样，任何系统都可以分解为构成的节点 V 和边 E，用图论表示为 $G=(V,E)$。

对于简单的系统，我们可以直接对其节点和边的几何图形进行研究，这就是传统的系统结构的研究方式。例如在化学中我们对化学结构的研究就是这样，我们主要关心构成化学结构的化学元素及其联系方式或者说叫结构方式。对任何系统，我们都把它简化、分解为节点以及连接节点之间的边，然后再研究它们的构成方式。这也符合还原论的思维方式及其方法论。因为这种分析方法与具体的构成要素、连接方式密切相关，这也就跟具体的学科密

①汪小帆，等．复杂网络理论及其应用［M］．北京：清华大学出版社，2006：8．

切相关,共性的东西比较少,因此简单系统的研究中虽然强调了结构的重要性,但对结构本身的研究并没有列为重点,也没有展开研究。面对复杂系统例如国际互联网系统,节点数成千上万甚至难于计数,其连接的边也几乎难于计数,因此沿着分解成节点和边,并对其单独进行研究的还原分析方法就很难进行,就像在统计物理学中,面对无数的分子或原子,如果我们要研究每个分子或原子的具体行为是十分困难的事情,而且即使能够做到,其意义也不是很大,因此统计物理学从统计学的视角对分子或原子的集体行为进行研究。众多的个体构成复杂系统之后,其集体行为就有了丰富的内容,但传统的分解方法无法揭示出来,而是也要借助统计的视角和方法,从整体上来研究复杂系统的集体行为。近年来兴起的复杂网络理论正是从方法论上进行革命,采用统计的视野和方法从整体上研究复杂系统的网络集体行为。

复杂网络理论为了刻画网络结构的统计特性,从统计的角度提出了许多概念和方法,其中有三个最基本的概念:平均路径长度、聚类系数和度分布,这些概念都是从整体上对复杂系统的结构进行宏观刻画,是系统结构的统计参数。

(一)平均路径长度

我们知道,系统都由要素构成,但要素之间的关系却是具有不同的关系。比如,一个村子的村民之间,一个单位的同事之间,相互间要么是亲戚,要么是同事,要么是同学,彼此都能认识,是一个熟人的关系圈。但在火车站的候车室里,虽然彼此之间近在眼前,但却相互都陌生,偶然遇见一个熟人会彼此都特别高兴,这就是为什么会老乡见老乡两眼泪汪汪。由此可见,系统中各要素之间的亲疏关系是不一样的。平均路径长度正是一个从宏观统计的角度反映系统要素彼此之间亲疏关系的参数。复杂网络理论中将两个节点(i,j)之间的最短路径上的边数定义为距离d_{ij},网络中任意两个节点之间的距离的平均值被定义为网络的平均距离L。

平均路径长度L科学地刻画了复杂系统网络成员之间的距离的统计特征。因此我们可以借助这个参数来刻画复杂系统的要素之间的联系的紧密程度,即从成员之间关系的紧密程度来刻画系

统的宏观结构。

(二)聚类系数

我们经常说,物以类聚,人以群分,这正反映出世界上的许多事情都有扎堆现象。例如,在生态系统中有生物群落现象;在产业发展过程中,有产业集群现象;在社会交往过程中,我们也会发现朋友的朋友有可能还是朋友,人际之间也可能由某种关系紧密联系在一起。复杂网络理论用聚类系数来刻画这种类聚的行为。所谓聚类系数 C 其实就是业已存在的联系 E 与最大可能的联系之间的一种比例关系,也就是说有多少可能联系已经变成了现实联系的比例。

从理论上来说,任何两个节点之间都可能建立联系,也就是任何两个节点都可能用边线联系起来。例如,社会中任何两个人都有可能建立起某种联系。但现实的情况并非如此,而是只有一部分人通过某种关系联系在一起,也就是说有些人联系紧密,有些人比较松散,也许就没有直接的或间接的联系。孤立的节点之间因为没有任何联系,其聚类系数变为零,即 $C=0$。如果网络是完全耦合连接的,即任何两点都相互连接,这时 $C=1$。

聚类系数事实上就是网络扎堆现象的科学刻画。瓦茨和斯特罗盖茨提出小世界模型的初衷就是想建立一个既具有类似随机图的较小的平均路径长度,又具有类似于规则网络的较大的聚类系数的网络模型。

(三)度与度分布

生活中有些人爱好交际,朋友众多,而且很有号召力,许多人都被团结在其旗下,成为组织的核心人物。有些人不善交往,孤家寡人,没有多少朋友,也不能把别人组织起来。复杂网络理论用"度"这样一个参数来刻画其朋友的个数,你有多少个朋友,这个 K 就是你的度。节点 i 的度 ki 定义为与该节点连接的其他节点的数目。节点的度是这个节点在网络结构中的重要性的科学度量,度越大的节点,其重要性也就越大,地位就越显赫。

所谓度分布,就是我们以朋友网络关系而言,我们随机找一个

人看看他有 K 个朋友的概率是多大,这个概率就是这个网络的度分布。我们最常用的分布,就是我们科研人员最常用的正态分布,具有这种分布的网络,它具有一个明显的特征长度 K。以城市的高速公路网为例,我们知道,通过每一个大城市的高速公路数目应该来说差别都不太大。这就是说,不可能一个城市有几百条高速公路都穿过。很多小机场实际上都是不大的,每天的航班数目都不太多,但是有少量的大的机场,它几乎每分钟都有飞机不停地在升起降下,比如说北京、上海、广州等国际航空港。这些航空港对网络连接起很重要的作用,如果把这几个大机场关闭,全国航空交通网络就会瘫痪。如果我们只是关掉小的机场的话,可以说对整个航空交通网络是没有影响的。所以,航空交通网跟城市的高速公路交通网是有很大的区别。这后一种分布就是幂次分布,这种分布没有特征尺度,即无标度。巴拉巴斯和阿尔伯特提出的无标度网络模型,则是基于许多实际网络的度分布具有幂律形式的事实。

以上三个参数从不同的角度对复杂网络的结构进行了科学刻画,这种刻画不是从分解、分析的角度把复杂网络一一分解,而是保持复杂网络的整体性,只是从统计的角度对其进行宏观的统计刻画。因此复杂网络理论为我们研究系统结构提供了一套有别于传统还原论分解径路的整体结构分析方法。

三、小世界:复杂网络的拓扑结构

要研究复杂网络的结构,除了上述的几个复杂网络的统计特征参数之外,我们还要构造具体的复杂网络的模型。建立合适的网络模型可以帮助我们理解上述统计参数的意义和产生机理。系统结构理论之所以在世纪之交取得了重大突破,就是因为瓦茨及其导师、巴拉巴斯及其导师分别发现了构造复杂模型的方法,并深入研究后发现了其令人惊讶的统计特性。这就是著名的小世界模型和无标度模型。

几乎每个人都有过这样熟悉的经历:在一次聚会或某个公共场合遇到一个完全陌生的人,经过短暂的交流后出乎意料地发现彼此认识同一个人,彼此都惊呼:这世界真小啊! 通过电影演员、学术圈的合作关系等诸多的实验研究后发现一个有趣的现象:“你

和这个星球上的任何一个人之间最多只有六度的分隔"。即使两个人之间没有共同的朋友,但他们也仅仅被很少的几个中间人分隔开来,这就是所谓的"小世界现象"。①

我们已经说过,小世界网络模型是瓦茨和斯特罗盖茨在1998年提出的基于人类社会网络的网络模型,它通过调节一个参数可以从规则网络向随机网络过渡。这个模型的构造算法是:从一个环状的规则网络开始,网络含有 N 个结点,每个结点向与它最近邻的 K 个结点连出 K 条边,并满足 $N \gg K \gg ln(N) \gg 1$。对每一条边,有 p 的概率改变它的目的连接点来重新连接此边,并保证没有重复的边出现,这样就会产生 $pNK/2$ 条长程的边把一个结点和远处的结点联系起来。改变 p 值可以实现从规则网络($p=0$)向随机网络($p=1$)转变。

小世界网络有三个特点:①具有较高的聚类系数;②平均距离比较小;③度分布基本上呈幂次分布。这些特性都是在小世界网络与规则网络和随机网络的比较中显现出来的。规则网络具有较高的聚类系数但其平均距离较大,而随机网络具有较小的平均距离但其聚类系数也小,与实际的复杂网络行为相比,这两种网络都不太相符,都是实际网络的极端状态。规则网络逐渐增加随机连接,其平均路径会随随机连接的增加而迅速减小,而其聚集系数在随机概率较小的情况下能基本保持规则网络的聚集系数,因此这类网络既具有较短的平均路径长度又具有较高的聚类系数,因此把两个极端网络的优点集中在一起,集中了规则网络和随机网络两者的优势。

复杂网络为什么会产生小世界现象呢?简单地说,是局部行为导致了全局性的结果。局部动态性和全局动态性之间的关系主要依赖于网络的结构。小世界通过少量的随机重连改变了规则网络和随机网络的特性,使小世界网络结构具有了规则和随机网络两者的优越性。这又让我们想起了处于有序和随机之间的混沌边缘能够产生许多奇异的各种复杂现象,甚至产生生命演化行为。

---

①邓肯·J.瓦茨.小小世界——有序与无序之间的网络动力学[M].陈禹,译.北京:中国人民大学出版社,2006:2.

小世界的网络结构其实也是处于规则和随机之间，也是处于有序与无序之间的混沌边缘，所以才能利用简单的规则产生复杂的行为。瓦茨利用人群之间传染病的传播、博弈论中的合作演化、元胞自动机的计算能力等多种简单的模型阐明了小世界现象的微妙之处。①

"小世界现象"并不是个别的，在复杂世界中往往是一种普遍的现象。瓦茨通过比较严谨的理论证明了在某种特定条件下，小世界现象会出现在任何一种类型的网络之中。也就是说，我们可以说小世界是无所不在的。例如大脑是一种神经网络；社会上的组织是人际网络；全球经济是国民经济组成的网络，国民经济又是市场组成的网络，而市场则是相互作用的生产者和消费者组成的网络。自然界中的食物链、生态系统等也是复杂网络。此外，解决某一问题的策略，一次谈话中的主题，甚至一种语言中的词汇都能够形成某种意义上的网络。瓦茨断言，这些网络都可以归结为"小世界网络"，都会表现出"小世界现象"。②

从科学方法的视野来看，小世界理论具有什么样的方法论意义呢？小世界理论通过相对少量的随机重连能够导致网络的特征长度显著减少，聚类系数显著增加。例如，世界人口有几十亿，看起来特别庞大，但是这星球上的每一个人都不过是被六个人分割开来。也即是说，人与人之间的平均接触距离是六个左右，这使得社会人群之间的距离大大缩短。一根六人藤蔓把我和这个世界上的所有人绑在一起，每个人都是一扇门，打开它就可以进入其他人的世界。难怪我们会把世界会称为"地球村"了，大大的世界实际上只是一个小小的村落。由此我们可以看出，小世界理论是观察、分析复杂网络世界的有趣视角和有效方法。复杂网络世界表面上虽然复杂，但如果站在小世界的立场去观察，使用小世界的方法去分析，问题就没有那么复杂，而且往往能够迎刃而解，因此小世界

①邓肯·J.瓦茨.小小世界——有序与无序之间的网络动力学[M].陈禹，译.北京：中国人民大学出版社，2006：165.

②邓肯·J.瓦茨.小小世界——有序与无序之间的网络动力学[M].陈禹，译.北京：中国人民大学出版社，2006：11-23.

理论是解决复杂网络问题的一把利器。

但我们怎样将小世界理论当成一种科学新方法呢？我们首先要分析网络的结构及其连接方式，看看是否介于规则与随机之间；其次，计算平均路径长度、聚类系数及其度分布，确定网络是否符合小世界模型；第三，利用小世界理论分析网络的小世界特性，并阐述其传播机制及其控制途径等。利用小世界方法，可以对传统方法无法解决的复杂巨系统网络进行结构、功能分析，是解决复杂网络问题的一把利器。

四、无标度：复杂网络的幂率分布

复杂网络的无标度性是1999年由美国学者巴拉巴斯和阿尔伯特共同发现的。节点的度反映了该节点在网络中的重要性。从节点的度分布函数来说，规则网络各个节点都有相同的度，而随机网络的度分布服从正态分布规律，巴拉巴斯和阿尔伯特发现，介于规则和随机网络的复杂网络，其度分布大多服从幂率分布。幂率分布说明，复杂网络的分布是分散的，特别重要的节点只有少数节点，而大部分节点都是一些普通节点，复杂网络节点的度是不均匀的。也就是说节点的重要性是不一样的，大多数是普通节点，重要性越高的节点，其数量越少。这也像某些不太公平的社会，少量的富人占据了大部分的社会财富，大部分的穷人只占有少数的财富。

复杂网络为什么会有这样的度分布规律？这主要是因为，复杂网络一般都是通过自组织形成的，没有一个管理、控制的中心机构。网络在生成的过程中，新节点如何与原来地方的节点相连接？巴拉巴斯和阿尔伯特认为，许多复杂网络都具有如下两个重要特性：

第一，自生长性：复杂网络自其涌现生成之后就会不断有新节点自动加入其中，因此网络的节点不断增多，连接的边数不断扩大，就像一个蜘蛛网，时时刻刻都在自动生长之中。例如万维网上时时刻刻都有大量新网页不断产生，论文网中每天都有新的文章不断发表，人类社会中每天都有新生命不断诞生并加入到社会大网络之中。网络的生长是自动进行的，符合自组织的规律。

第二，优先连接性：新的节点在接入网络之时，更优先选择那

些连接度比较大的节点作为其连接的节点，这样原来连接度大的节点，其连接度将会更大。这就像圣经所说的马太效应，穷者越穷，富者越富。这也就造成了少数节点连接着大量的边线，大部分处于末端的节点，因为其连接度不大，更没有新节点愿意往上连接。例如，出名的导师有众多的弟子追随，其出名度也就越大；出名的演员会被更多的导演看中，于是会更加出名；新写作的论文在引用参考文献时也往往选择那些已被广泛引用的重要文献。正因如此，节点的度分布才会按照幂率来分布。“BA 无标度网络的精彩之处在于把实际网络的无标度性，归结为增长和优先连接这两个非常简单明了的机制。”①

从复杂网络的三个统计参数来说，①BA 无标度网络的平均路径长度为 $\log N/\log(\log N)$，这表明 BA 网络具有小世界特性；②BA 的聚类系数与 ER 随机网络类似，当网络规模充分大的时候，BA 无标度网络不具有明显的聚类特性；③度分布服从幂率分布。

任何网络在外力的干扰之下，无非有两种情况出现，要么系统没有抗干扰性而出现网络被破坏，要么网络具有抗干扰性而继续保持其网络结构，前者被称为系统的脆弱性（fragility），后者被称为鲁棒性（robustness）。从这两个特性来看，BA 无标度网络对随机节点故障具有极高的鲁棒性，这主要是因为 BA 网络的度分布服从幂率分布，具有极端的非均匀性：绝大多数节点的度都相对较小，而只有少量的度相对很大，因此随机故障或攻击，能击中要害节点的可能性比较小。但是，对于蓄意的攻击，BA 网络却表现出极大的脆弱性。这是因为只要有意识地选择攻击那些度分布高的极少量的节点，网络的连通性就会受到极大的影响，甚至可能导致整个网络的瘫痪。我们可以随机去除网络中大量的节点，无标度网络仍可以保持基本的连通性，而随机去除同样多的节点，则可使一个同样规模的随机网络分离成多个孤立的子网；但蓄意去除少量的度最高的节点就可以破坏无标度网络的连通性。“对随机故障的鲁棒性和对蓄意攻击的脆弱性是无标度网络的一个基本特征，其根

①汪小帆，等.复杂网络理论及其应用[M].北京：清华大学出版社，2006：33.

源就在于其度分布的不均匀性。"因此,"鲁棒但又脆弱(robust yet fragile)是复杂系统的最重要和最基本的特征之一"。①

对BA无标度网络的度分布研究后发现:①实际网络的度分布指数不会低于1;②度分布指数位于1~2之间的复杂网络存在数量较多的HUB节点,并且其边数与节点数之间的关系是非线性的,节点数的增加导致边数的大幅度增加;③度分布指数位于2~3之间的复杂网络只存在一定数量的HUB节点,其中的边数与节点数之间的关系是线性的,大多数受成本制约的技术类网络属于这种类型;④度分布指数大于3的复杂网络类似于随机网络,近似于均质网络。②

无标度网络是分析复杂网络结构的一种重要方法,具有一般科学方法的意义。面对复杂系统,我们首先可以把系统的要素及其相互作用转变为节点和连线,也就是转变为复杂网络问题;然后分析、计算复杂网络的度及其分布规律,如果其都分布服从幂次定律,那么该网络肯定属于无标度网络;第三,根据无标度网络的特性,我们可以寻找其生长规律和优先连接规律;第四,根据度分布规律,可以寻找出连接度最大的节点,分析复杂网络的鲁棒性和脆弱性,并由此提出复杂网络的传播、控制规律等。

无标度网络模型是复杂网络的一般模型,因此它具有普遍性和广泛性。在过去的几年中,研究者们在很多系统中都发现了无标度网络结构。例如,因特网、万维网、国际航空网、电讯电话网、供电网、生物中的新城代谢网络等,都属于无标度网络的典型。在研究因特网的物理结构时,研究者研究了路由器的连结情况,他们发现,这个网络的拓扑结构也具有无标度性。美国波士顿大学和瑞典斯德哥尔摩大学的科学家们共同研究显示,瑞典民众的性关系网络也遵循幂次定律:尽管大部分人终其一生只有少数几个性伴侣,但有少数人(集散节点)的性伴侣多达数百人。波士顿大学的勒德纳(Redner)则证实,由科学论文之间引用关系所连结的网络,同样也遵循幂次定律。美国密歇根大学安娜堡分校的纽曼

---

①汪小帆,等.复杂网络理论及其应用[M].北京:清华大学出版社,2006:31-32.

②王林,戴冠中.复杂网络的度分布研究[J].西北工业大学学报,2006(4):408.

(Newman)研究了包括物理和计算机等一些学科内科学家之间的合作关系网络,他发现这些网络同样也是无标度的。此外,好莱坞的演员关系网络、美国生物技术产业联盟网络,细胞中蛋白质的交互网络,等等,都具有无标度性。①

以上这些不同系统之间,在网络拓扑结构上的相似之处,以及无标度网络的形成原因,成为时下网络结构研究的热点。很多科学家从各种不同角度,对无标度网络进行了分析。其中,巴拉巴斯和阿尔伯特在分析了随机网络 ER 模型的基础上,建立的 BA 模型尤为精炼,很好地说明了无标度网络的成因。因此,无标度网络分析方法已成为分析复杂系统结构的重要科学方法之一。

五、以网观之:观察世界的科学新视野

自从瓦茨、巴拉巴斯等人在世纪之交发表小世界和无标度的研究成果以来,复杂网络理论研究取得了令人瞩目的成果,引起了国际科学界的广泛关注。

小世界和无标度网络的发现,不但开创了复杂网络研究的新局面,而且对系统科学的研究特别是对系统结构研究也有重要的意义。网络不但是许多复杂系统的结构形态,还可以作为系统结构拓扑特性的模型。一切事物都是处于相互作用之中,一切学科研究的都是某种要素和层次的相互作用。例如,物理学研究物体间最基本的相互作用,化学研究分子间的相互作用,生物学研究生物体之间的相互作用,社会科学研究人与人、人与社会组织之间的相互作用。事物作为系统,其结构可以抽象为网络,各类相互作用的主体可以抽象为节点,相互作用可以抽象为节点之间的连接线或边。我们可以运用复杂网络分析的理论、方法和工具对复杂系统结构进行拓扑特性研究。

小世界现象和无标度网络的发现是系统结构研究深入发展的一个契机,有可能以复杂网络的拓扑特性研究为切入点,深入开展系统结构的研究。系统结构是系统科学的一个基本概念,但目前

---

①陈禹,钟佳桂.系统科学与方法概论[M].北京:中国人民大学出版社,2006:120.

还没有得到充分、深入的研究。虽然各门具体科学对其自身领域的系统结构做了比较具体的研究,形成了丰富的研究成果,但就一般层次的系统科学来说,系统结构研究的成果还不多,特别是面对复杂系统,结构分析更是无能为力。小世界、无标度网络的发现,为我们开拓了结构研究的新视野,并实现了研究方法论的根本转变,从还原论思维和方法走向了整体论思维和方法。系统结构可以被描述成网络结构,但是传统图论中的规则图和随机图理论与现实网络结构及其行为不太相符,它们只反映了两个极端的情形。大多数实际的复杂网络介于两个极端之间,具有动态演化性、开放自组织性,并且规则和随机相伴随。单纯的规则图和随机网络理论对普遍存在的实际的复杂系统不能进行实质性的分析研究。小世界和无标度网络的发现为复杂网络的研究和复杂系统的结构研究开启了一扇新大门,其研究成果反映了大多数复杂系统真实行为的基本特性,复杂系统的结构研究因此取得了实质性的突破,也为我们观察和分析复杂世界提供了一种新的方法工具。

中国哲学中一直存在"以道观之"和"以物观之"两种观察世界的方法。面对纷繁复杂的网络世界,我们以前往往束手无策,要么用还原的方法彻底进行还原解剖,要么就是归于神秘。随着复杂网络理论的兴起,我们又有了一种新的观察世界的新视野和新方法,我们可以称之为"以网观之"。"以网观之"就是将复杂网络理论提升为一种新的网络世界观、认识论和方法论,以网络的观点看世界,以网络的方法去认识世界和解决相关的问题。

如今,小世界和无标度理论等复杂网络理论已经被作为一种新颖的世界观来重新观察这个复杂网络世界,并将这种新研究方法应用于许多与网络连通性以及复杂系统的一般行为有关的问题中。例如,万维网上从一个网页到另一个网页平均需要点击多少次鼠标;层出不穷的计算机病毒是如何在互联网上传播的;疾病(或谣言)是如何通过社会网络流行的;在大规模的团体中,合作是如何演化的;在巨大的电力网或者金融系统中,故障或震荡是如何传播的;对一个组织或者一个通讯系统而言,什么样的体系结构最为高效。复杂网络理论已经令人着迷,而且在物理学、数学甚至社会学、经济学和生物学等诸多截然不同的领域产生着深远的影响。

第四节　社会关系的网络分析

网络结构研究固然重要，但其最终目的是通过研究结构来了解和解释基于这些网络之上的系统运作方式，进而预测和控制网络系统的行为。一般将这种建立在网络上的系统动态性质称为网络上的动力学行为，其涉及面非常之广，如系统的渗流、同步、相变、网络搜索和网络导航，等等。① 上述研究理论性较强，而有一类应用性很强的网络行为研究已经日益引起人们的兴趣，如计算机病毒在计算机网络上的蔓延、传染病在人群中的流行、谣言在社会中的扩散，等，实际上它们都是一种服从某种规律的网络上的传播行为。传统的网络传播模型大都是基于规则网络的，复杂网络研究的深入使我们重新审视这一问题。

一、社会网络分析的兴起

在社会科学领域，社会网络分析方法也通过引入数学图论和计算机技术为手段而日臻成熟，甚至带来"社会学的新古典革命"。有学者认为，网络分析对社会学发展的突出贡献表现在以下几个方面：第一，提出了一系列指导着社会网络研究的概念、命题、基本原理及其相关的理论，使社会学对于社会结构的研究面目一新。社会网络分析形成了受到大规模的经验研究支持的一套首尾一致的特征和原理。网络分析者在社会关系的层次上将微观社会网和宏观的社会结构连接起来。第二，在研究方法上，通过创造一系列更好的理解结构和关系的测量手段、资料收集方法和资料分析技术，摆脱了范畴或属性分析的个人主义方法论、还原主义解释和循环论证的困境。第三，网络分析涵盖甚至超出了社会学研究的传统领域。经过40年的发展，社会网络分析已经从初期的小群体研究扩展到社区、社会阶层、社会流动、社会变迁、社会整合与分化、城市社会学、经济社会学、政治社会学、组织社会学、社会工作、科

①刘涛，等. 复杂网络理论及其应用研究概述[J]. 系统工程，2005(6)：4-5.

学社会学、人类生态学以及一些边缘性学科如精神健康学、老年学领域，甚至一些经济学家和心理学家也自觉运用社会网络分析的有关概念和方法研究经济与社会的关系和人与人之间的关系。

社会是一个由多种多样的关系构成的巨大网络。如何研究关系？视角当然多种多样，既可以像林语堂的小说中描述的那样对关系进行细致的刻画，又可以像黄光国等社会心理学家那样对人情、面子和关系网进行质的描述，更可以用社会网络分析法对关系进行量化的表征，从而揭示关系的结构，解释一定的社会现象。社会网络分析的意义在于，它可以对各种关系进行精确的量化分析，从而为某种中层理论的构建和实证命题的检验提供量化的工具，甚至可以建立"宏观和微观"之间的桥梁。

社会网络是社会行为者(actor)及其相互关系的集合。一个社会网络是由多个点(行为者)和各点之间的连线(关系)组成的集合。用点和线表示网络，即对社会网络的分析做形式化的界定。通过描述群体关系的结构，我们可以研究这种结构对群体功能或者群体内部个体的影响，还可以研究群体变迁的历史过程。也就是说，"社会结构"建立在"关系"之上，因而可以通过对关系数据的收集和分析来揭示社会结构。搞好各方面的"关系"是中国人习以为常的事情。或者说，从日常生活角度讲，国人已经对"关系"熟视无睹了。从学术研究的视角看，确实有很多学科、很多学者对"关系"进行了细致的研究。但是，总的来说，这些研究都属于对关系的"质的研究(qualitative research)"，没有从量化的角度分析社会关系的内在结构特征。社会网络分析就是对社会关系进行量化分析，也就是说，行为者和他们的行为被视为相互依赖的而不是相互独立的自治单位，行为者之间的相互链接是自愿前行或"流动"的通道。

社会网络分析通过一系列的基本概念和数量参数来达到研究社会网络关系的目的。① 例如，距离、方向、密度、度数、位置、中心度、中心势等基本概念，以及刻画权力量化分析的中心性、社会结构量化分析的凝聚子群、社会角色量化分析的对等性和刻画位置量化分析的核心与边缘等数量参数。

---

①约翰·斯科特.社会网络分析法[M].刘军译.重庆:重庆大学出版社,2007.

二、刻画社会网络的数量参数

下面我们根据陈禹等学者的工作对刻画社会网络的四种主要数量参数做一点简单的介绍，从中可以看出复杂网络方法在社会网络分析中的应用。①

（一）中心性——权力的量化分析

“权力”是社会学中的一个重要概念。一个人之所以拥有权力，是因为他与他人存在关系，可以控制、影响他人。社会网络分析工作者从“关系”的角度出发定量地界定权力，并且给出了多种关于社会权力的具体的形式化定义，即各种中心度和中心势指数。中心性是社会网络分析中的重点之一，行为者越处于中心位置，其影响力越大。中心度是指点的中心性，而中心势则是指一个作为整体的图的中心性。它又包括：点度中心性、中间中心性、接近中心性、权力指数。

（二）聚集子群——社会结构的量化分析

社会学研究的一个重要任务是揭示社会的结构，对社会结构的研究存在两种思路：质化的结构观和量化的结构观。社会网络分析学者对社会结构进行量化研究，认为社会结构是在社会行为者之间实存或潜在的关系模式。分析网络中存在多少派系，每个派系之间是什么关系，派系内部成员之间的关系具有怎样的特点，一个派系的成员和另一个派系的成员之间的关系又具有怎样的特点等，这些便是对社会结构的定量研究。凝聚子群是满足如下条件的一个行为者子集，即在此集合中的行为者之间具有相对较强的、直接的、紧密的、经常的或者积极的关系。

（三）对等性——社会角色的量化分析

在社会网络分析中，社会角色是指“网络角色”，网络分析者在谈论角色时更多地是为了把握行为者之间的关系模式的相似性，

---

①陈禹，钟佳桂．系统科学与方法概论[M]．北京：中国人民大学出版社，2006：123-128.

而不是行为者的个人属性及其类别和个体变量。如果两个行为者与所有其他行为者之间的关系模式相同,我们就说这两个行为者具有相同的社会角色。"角色研究"与"凝聚子群"研究是不同的,前者的目的是把相似的行为者分到同一个派别中,每一派内部的行为者是相互对等的,因为他们拥有类似的结构特征,各个派别的行为者之间则不是对等的。"凝聚子群"研究主要是为了找到整体网络中的一些子网络和子群体。总之,在社会网络研究中,"相似性"至少有三种不同的类型:结构对等性、自同构对等性、规则对等性。

(四)核心与边缘——位置的量化分析

伊曼纽尔·沃勒斯坦(Lmmanuel Wallerstain)在其著作《现代世界体系》中指出,现代世界体系是一个经济体系,资本主义是其基本内核,其结构特征是:中心——半边缘——边缘。

世界范围内的劳动分工将世界划分为三个地带,即中心地区(二十多个发达资本主义国家)、半边缘地区、边缘地区(多数发展中国家)三个部分。社会网络分析者从模型的角度研究核心-边缘结构,这就使核心、边缘等有了明确的操作化标准。利用某种核心-边缘模型,并结合现实数据,可以判断行为者所处的位置,或者估计出行为者的"核心度(coreness)",从而对行为者处于什么位置有一个量化的认识。

从上述的相关概念和刻画参数来看,虽然社会网络分析这一学科已经具有了近 80 年的历史,但其真正的发展是随着复杂网络理论兴起之后才有了迅猛的发展,因此可以看作是复杂网络方法在计量社会学中的应用。社会网络分析已经具有比较悠久学科历史,丰富的学科内容,对此有兴趣的读者可以参看相关的专著,从中可以明显看出社会网络分析与复杂网络理论之间的联系,在此我们就不做太多的介绍。①

①刘军.社会网络分析导论[M].北京:社会科学文献出版社,2004.

结　语

通过对复杂性科学各学科分支的要点回顾和科学方法意义的挖掘，我们基本上完成了复杂性科学方法的提炼工作。我们从中提炼出了涌现生成方法、适应维生方法、遗传进化方法、临界突变方法和复杂网络方法等五种复杂性科学的具体科学新方法。这些方法是科学方法大家庭的新成员，将更加丰富科学方法的理论宝库，并丰富复杂性科学方法论的结构体系。由于前面各章分而论述，在此我们有必要做一个比较全面的总结，以便有更清晰完整的复杂性科学方法的体系结构框架。

一、复杂性方法的基本含义

我们无论做什么事情都讲究方法，希望能够达到我们预先设想好的目的，并尽量事半功倍。所谓方法就是人们为了达到一定的目的而采取的手段、途径或活动的方式。人类创造了各种各样的方法，因此需要对方法本身进行比较、甄别等研究，这种以方法为研究对象的学科就是方法论，它是对方法二次加工而得到的理论体系。孙小礼教授概括得更完整，她说："方法论是从认识论的角度总结人类认识世界、改造世界、保护和发展世界的经验，探讨各种方法的性质和作用以及各种方法之间的相互联系，概括出关于方法的规律性的认识的知识。"①

①孙小礼. 科学方法中的十大关系[M]. 上海：学林出版社，2004：绪论第 15 页.

由于自然科学在其研究中要设计好研究目的、手段、检验措施等,通过构造性的自然观和可检验的实验手段,从而形成了一系列从事科学研究的方法,而各种科学理论又成为人们从事其他认识或实践活动的有效手段,这些都被称为科学方法。自然科学创造了各种各样的科学方法,如观察方法、实验方法、归纳方法、演绎方法、模型方法等,并由此构成了科学方法论。① 其实每一种科学理论都是对隐藏在现象背后的一般规律的探索,几乎都可以成为达到某种目的的手段,因此都可以成为科学方法。以科学方法为对象而进行系统化二次加工的学科就是科学方法论。

20 世纪 80 年代开始,科学界兴起了以超越还原论为方法论特征的科学革命。他们把以还原论为方法论基础的科学称为简单性科学,而以超越还原论为方法论基础的一系列新科学称为复杂性科学。其实从本质上来说,复杂性科学是从 20 世纪 30 年代兴起的系统科学的延续。如果说以系统论、信息论和控制论为代表的"老三论"为代表的系统理论是系统科学发展的第一阶段,而以耗散结构理论、协同学、突变论等"老三论"为代表的自组织理论是系统科学发展的第二阶段,那么现在的复杂性科学就是系统科学发展的第三阶段。系统科学自其诞生以来就由于其反还原论的特色而被其他学科领域所广泛应用,例如系统方法、黑箱方法、信息方法、自组织方法等,这些方法其实都是从系统科学各个学科分支中提炼、抽取其具有一般科学方法意义的内容,并能够被其他学科广泛应用的科学新方法。

随着复杂性科学的兴起,复杂性科学方法也就应运而生。所谓复杂性方法就是从复杂性科学中挖掘、提炼出具有一般科学方法意义的科学方法工具。复杂性科学从其发展初期开始有两种发展路径,一种是思维变革路线,另一种是科学理论建构路线。第一种路线具有更浓厚的哲学色彩,是建构复杂性方法论的重要途径。第二种路线具有更浓厚的自然科学色彩,是建构复杂性科学方法的重要途径。复杂性科学都是在批判还原论的基础上,以有机自

---

①孙小礼. 方法论[M]. 北京:高等教育出版社,1993.

然观为基础对复杂系统进行比较“原生态”的系统研究，没有对复杂现象进行过多的还原、简化，基本上保持了复杂系统本身的复杂性。这些理论与简单性科学时代处理科学对象的方法具有本质的区别，是一种从新思维、新手法探索复杂系统规律的新理论，是对复杂系统认识和实践规律的新探索，因此如果能够挖掘、提炼出其中蕴藏的方法，那就是对科学方法及科学方法论的贡献。

二、复杂性方法的理论构成

要从科学理论中挖掘、提炼出隐藏在复杂性科学理论中的科学方法，就必须深入到复杂性科学的具体理论中去，也就是说，复杂性方法必须以复杂性科学理论为基础。因此，要提炼出具有一般科学方法意义的复杂性方法，我们就必须梳理出复杂性科学有哪些重要的科学理论。

复杂性科学兴起已经有了20多年的历史，但是离学科成熟似乎还很早。一开始，复杂性科学主要是一种思维方式和方法论的变革，是对传统的机械自然观和还原方法论的反动，甚至有人把它当成一种革命和运动，并称之为复杂性运动。

随着复杂性科学的发展，复杂性就不仅仅停留在思维变革和方法革命的软科学层面，而是慢慢深入到具体的学科和理论建构等具体工作之中。复杂性科学的创立者们的初衷是要结束学科分立的局面，找到处理各种复杂性的共同框架和统一理论，但随着学科的发展，不同的学者各自从自身的学科背景和视角出发，建构了不同的复杂性理论分支。就像控制论的创立者诺伯特·维纳所描述的控制论创立之前的情形：“这些专门化的领域在不断增长，并且侵入新的疆土。结果就像美国移民者，英国人、墨西哥人和俄罗斯人同时侵入俄勒冈州所造成的情形一样——大家都来探险、命名和立法，弄得乱七八糟、纠缠不清。”①复杂性科学提出来之后，许多学者都参与了该学科的建设，但也因此引起了一些困惑和混乱。《科学美国人》资深撰稿人约翰·霍根在《科学的终结》一书中，嘲

①诺伯·维纳.控制论[M].郝季仁，译.北京：北京大学出版社，2007：13.

笑复杂性研究为“混杂学”,“耕耘在混杂学领域的人们所做的工作包罗万象,无所不涉”。①

在复杂性科学研究者的努力下,有些理论逐渐崭露头角,并逐渐走向成熟。从复杂性科学短暂的发展史中,我们梳理之后发现,比较得到公认的复杂性科学主要有如下六个理论分支:霍兰创立的遗传算法理论、复杂适应系统理论和涌现理论,以及巴克等人创立的自组织临界性理论、朗顿等人创立的人工生命理论和近年来热门的复杂网络理论。也就是说,上述几个理论分支共同构成复杂性科学的学科群。为什么这些理论分支都号称为复杂性科学呢?这些不同的复杂性理论究竟是什么样的关系呢?它们在复杂性科学的体系中应该处于什么样的地位呢?这是我们挖掘、提炼复杂性科学方法首先遇到的重要问题。要研究复杂性科学方法的意义,我们就必须厘清复杂性科学究竟由哪些主要理论构成,并弄清楚它们之间的结构关系。

涌现生成理论主要探讨组织是如何诞生的问题。一些基本的要素,几条简单的规则,经相互作用后却涌现出复杂的结构和行为。这些涌现现象几乎处处可见,但这些现象背后的机制等本质问题却难倒了科学界和哲学界最智慧的学者。面对涌现生成的各种现象,我们特别需要有一套具有一般科学方法意义的解释系统。霍兰通过解剖西洋跳棋、神经网络等涌现案例的分析,提出了具有普适意义的涌现理论,比较好地解释了由积木、规则经过受限生成过程后所产生的涌现过程、规律和动力机制等问题。因此,如果我们从科学方法论的视野来看,霍兰的涌现生成理论可以提炼出解释一般组织涌现生成的普适方法,即涌现生成方法。

复杂适应系统(CAS)理论关注的主要是系统内部各要素之间的适应性以及系统与环境之间的适应性问题。由于霍兰说适应性造就复杂性,让我们误认为CAS理论主要讲的是由适应性而产生的复杂性问题。通读其著作后,我们发现,CAS理论的本质其实是探讨系统是如何通过系统内部之间以及系统与环境的适应性来保

①约翰·霍根.科学的终结[M].孙雍君,译.内蒙古:远方出版社,1997:285.

持系统的稳定性和持存性。按理说，环境变了，我们的系统也应该变化，因此造成系统的不稳定性。但是，由于系统具有适应性，因此环境变化之后系统通过调整自身的结构和行为来适应环境的变化，系统和环境之间仍然保持一种稳定的关系。其实，霍兰开宗明义，一开始就用小姑娘逛超市的例子来说明适应性造就稳定性的问题。他说："一个城市的协调运作，似乎是与人们永不停止的流动和他们形成的种种结构分不开的。……没有哪个组成要素能够独立地保存不变，但城市本身却延续下来了。"①正是通过系统结构和局部的适应性行为造就了系统外部整体的不变性和稳定性。因此，CAS 理论其实是提供了面对纷繁复杂的外部世界，复杂组织仍然能够保持稳定的秘密，或者隐藏在适应性背后的秩序。我们的世界千变万化，但变化之中也有稳定性，体现的正是达尔文进化论"适者生存"的中心思想。CAS 理论正好为我们解释这些现象提供了科学的理论依据，从而为我们提供了一套分析组织诞生之后为什么能够维持稳定的普适科学方法，即适应维生方法。

遗传算法理论是霍兰早期创立的一种进化计算理论，是四种进化计算理论中比较成熟的一种。从表面上看，它无非就是一种算法罢了，但用科学方法的眼光再深入其中后就会发现，它的理论核心无非就是利用原来所提供的组织（染色体）通过复制、交换、变异等三种手段，从微观层面上解决了从一到多、从小到大、从旧到新的微观机制，这其实就是组织的发展机制问题。我们在哲学上曾说，发展的本质就是新陈代谢，但陈的如何产生新的，新的又如何代替陈的，其实并没有找到科学的解释方法，因此一直停留在比较宏观的一句空话上。遗传算法却深入到系统的内部，进入染色体这样的微观层面，科学地刻画了组织是如何通过选择优秀的种子并大量复制而产生下一代，又如何通过交换、变异等手段产生不同于父代的新生代。它既解决了好的东西如何传承下去，又解决了新的东西如何在陈的母体中诞生的微观机制，细致地刻画了优胜劣汰、新陈代谢的过程。因此，通过挖掘，我们可以从遗传算法

①约翰·H.霍兰.隐秩序——适应性造就复杂性[M].周晓牧，韩晖，译.上海：上海科技教育出版社，2000：1.

中提炼出具有普适意义的科学方法，即遗传进化方法，用于解释复杂组织是如何发展进化的问题。

自组织临界性理论和混沌边缘理论关心的都是系统处于某种临界状态所出现的复杂突变行为问题，但混沌边缘理论没有自组织临界性理论那样成熟。自组织临界性理论向我们描述了这样一种现象，系统由于某些原因，其状态处于特别敏感的临界状态，并且只要有轻微的风吹草动，系统就发生像雪崩一样的突变行为。这种雪崩行为因为包含着难于计数的大量单元，我们无法对单个元素进行微观跟踪描述，只能刻画其宏观的统计行为，并找出其宏观规律。一个组织系统在其发展过程中，并不总是和风细雨，而是不时有暴风骤雨，这就是马克思主义哲学所说的量变质变规律所描述的情形。但由于雪崩行为发生突然，而且包含大量要素，我们对此一直无能为力，因此哲学规律也就略显苍白。自组织临界性理论正好填补了这个空白，向我们详细描述了临界状态下组织雪崩的过程及其规律。如果能够挖掘出一般理论，那就能够成为刻画复杂组织突变机制的普适科学方法，即临界突变方法，让我们面对组织复杂的临界雪崩，也能够迎刃而解。

复杂网络理论作为最新发展起来的复杂性理论分支，其核心问题是网络结构及其规律问题。系统结构一直是我们特别关注的问题。面对简单系统，我们可以直接刻画其结构，但面对复杂系统，我们往往就力不从心。这是因为复杂系统要素众多，存在大量的非线性相互作用，而且是开放系统，要刻画这样复杂的系统结构，如果依然描述每一个要素间的细节，再强大的计算机都难于应付。复杂网络理论另辟蹊径，不再追究微观结构，而是从宏观的统计视野出发，探索复杂系统的统计规律，而且还卓有成效，发现了小世界现象和无标度规律，让我们面对复杂系统的结构再也不会面露难色。复杂网络理论不仅仅是一种系统结构分析理论，如果我们用科学方法论的观点去透视，就会发现，它向我们提供了观察分析复杂世界的一种普适方法，即复杂网络方法。复杂网络理论让我们能够用网络的眼光看世界，而且立即让我们感觉到世界其实很小。

我们所提炼的五种复杂性科学方法都具有扎实的科学根据，

都是从复杂性科学比较成熟的理论分支中挖掘出来的。因此，复杂性科学的五个比较成熟的理论分支是我们提炼复杂性方法的科学基础。

三、复杂性方法的适用范围

复杂性科学没有统一的学科理论，只有统一的哲学信念和方法论特性。复杂性科学的各个学科分支之所以都被称为复杂性科学，是因为它们都有着共同的复杂性范式，因此我们把从中提炼出来的方法统称为复杂性方法。我们知道，复杂性科学目前有五种比较成熟的学科分支，由每种理论分支提炼出来的科学方法也各不相同。这些复杂性理论和复杂性方法分支之间是否融洽呢？学者们为什么要创造这么多理论分支？它们之间是否存在重复和矛盾？为此，我们有必要考察一下复杂性方法各分支的各自适用范围。

在超越还原论的这场复杂性运动中，众多学者创立自己的理论（其中包括中国学者钱学森等创立的复杂巨系统理论），都被称为复杂性理论或复杂性科学。一开始往往让人眼花缭乱，理不出头绪。但我们深入其中之后就会发现，这些理论虽然都有复杂性理论的共同特征，但侧重点是不一样的。其实，复杂组织的生命过程大致可以分为诞生阶段、生长阶段和衰亡阶段，其中还包括维稳和突变问题。涌现理论主要关注组织系统是如何诞生的，因此是系统的起源或发生问题；复杂适应系统理论主要关注组织系统对环境的适应性，因此是系统的维稳或生存问题；遗传算法理论主要关注组织系统的遗传进化过程，因此是系统的发展或演化问题；自组织临界性理论主要关注在临界状态下，组织系统的急剧变化特别是雪崩现象及其规律，因此是系统的突变问题；而新近发展的复杂网络理论主要关注的是组织系统的结构问题，即如何认识复杂系统的内部结构，因此是系统的结构问题。由此可见，这些理论的研究对象都是复杂系统或复杂组织，都希望认识和解剖复杂系统，寻找出复杂系统的内在规律。但是它们关心的却是复杂系统不同发展阶段的问题或者复杂系统不同侧面的问题。它们分别处于不同的理论生态位，分别解决了复杂系统的不同问题，但联合起来正

好对复杂系统有了比较完整的认识。除了复杂系统的解体、衰亡问题还没有解决外①,复杂组织整个生命过程都有了不同的对应理论来解决,因此共同构成了复杂系统理论或复杂性科学。

因为复杂性科学各分支理论处于复杂性科学的不同学科生态位之中,因此从这些理论中提炼出来的科学方法也就处于不同的方法生态位,由这些处于不同生态位的科学方法分支共同构成比较完整的复杂性方法体系。为此我们有必要对这些复杂性方法的地位问题进行讨论,以便理清它们的适用范围。

涌现生成方法分析了一个组织系统诞生条件问题,它研究了由最基本的构成要素(积木)和基本的因果规则,相互作用之后诞生出的有着复杂结构的复杂组织。运用这个方法我们可以从基本的积木和规则出发,分析复杂组织的诞生条件、内在逻辑、动力机制以及环境策略等问题,帮助我们了解什么样的条件能够诞生复杂组织,并帮助我们创造复杂组织的有利条件。涌现生成方法的实质就是复杂组织的生成条件分析,因此我们可以把涌现生成方法看作具有发生意义的科学方法,是复杂组织整个生命过程中具有首要意义的起点分析方法。这一方法适用于科学分析复杂组织生命周期第一阶段的涌现生成现象和规律,并让我们创造条件利用一些基本构件和规则去生成、建构我们所需要的一些复杂组织。

适应维生方法适用于分析复杂系统生命周期第二个阶段的系统维生机制问题。复杂组织在诞生之后最需要面对的问题就是如何生存下去。生存问题其实不仅仅在组织刚刚诞生的初期,而是贯穿在组织的整个生命周期之中,只是在诞生初期维生、稳定问题显得更加突出和重要,因此我们把它放在系统生命周期的第二阶段。维生问题与系统稳定性问题联系在一起。传统的看法认为所谓的稳定就是保持不变,以不变应万变,这是一种静态的稳定观。

①复杂性科学目前还没有对复杂系统的老化、衰亡、解体等走向衰亡的阶段进行详细的研究,更没有建立相应的学科分支。其实组织的衰老死亡问题是组织系统理论特别重要的问题。金观涛先生在其《整体的哲学》中曾经用功能异化来解释,但这还只是哲学式的猜想,最起码复杂性科学还没有相应的理论分支对其进行科学的解释。也许复杂系统衰亡问题将会成为复杂性科学今后关注的热点。

事实上面对不断变化的多变环境，系统是不可能完全保持不变的，只能以变化应万变，在动态变化中保持着与变化环境的相互适应。适应维生方法正是通过系统与环境的适应性来分析系统维持生存的能力。适应维生方法通过适应性主体的七个基本特征来作为建构适应性的基础，然后分析单主体的适应行为和多主体的维生机制，从而达到系统适应性造就维生性的复杂系统维生机理分析。

遗传进化方法适用于复杂系统生命周期的第三个阶段的进化、演化或者说发展过程分析。生长、演化或发展问题在系统生命周期中具有极其重要的地位。在系统诞生并站稳脚跟之后，必然要进入发展、生长阶段。只有经过生长这个阶段，系统才能走向成熟。遗传算法通过深入到系统的染色体层次来建构一套分析方法，利用优秀的父母染色体进行大量复制而继承父代优势的后代，通过交叉和突变而产生新的后代，从而得到了新陈代谢哲学思想的科学表达。通过遗传进化方法，我们可以将长期困扰人们的发展机制问题得到科学的解释，并把握继承和创新的具体方法，掌握系统发展的规律、路径和动力，从而揭示组织生长的科学奥秘。

临界突变方法适用于系统诞生之后的整个生命周期之中，无论是诞生阶段还是生长阶段，系统都有缓慢变化和雪崩突变两种可能。其实雪崩突变和适应维生正好相反，适应维生更广泛，是任何系统都必须具备的基本机制；而临界雪崩虽然也不断发生，但并没有适应维生那么普遍和必然，有些系统也许终生没有进到这种临界状态并产生雪崩突变行为。通过临界突变方法，我们可以科学把握系统在临界状态下微小扰动引起的摧枯拉朽的雪崩现象及其规律，同时它也是我们马克思主义哲学质变量变规律的一种科学刻画，让我们对系统的突然变异有一个比较详细的科学认识，并充分利用其机制控制临界雪崩或将系统推入临界状态而产生我们所需要的雪崩行为。

复杂网络方法不同于上述四种复杂性方法。上述四种方法都是适用于分析组织系统生命周期的某一阶段或贯穿于整个生命周期之中，都是属于组织系统的动态过程分析，而复杂网络方法却是一种结构分析，是对复杂系统结构分析的一种科学方法。任何系统都有自身的结构，系统结构又和系统功能紧密联系在一起，因此

系统结构分析是系统分析的重要组成部分。面对复杂系统,特别是钱学森所说的开放的复杂巨系统,要把握系统的结构及其规律是极其困难的。复杂网络方法创造性地借用了统计方法,从宏观视角去把握复杂系统的统计规律。通过复杂网络方法,我们可以科学地认识系统结构的统计规律。它让我们认识到,再复杂的网络系统我们都可以找到认识的科学方法,而且从中可以看到,世界虽然复杂,却呈现出小世界现象和无标度行为等简单的现象和规律,为我们认识复杂世界提供了以网络之眼看世界的科学认识方法,并通过这些规律来掌控复杂世界以实现我们既定的目标。

由此可见,从复杂性科学各分支理论中挖掘出来的五种复杂性方法虽然各有自己的适用范围,只是解决了复杂系统的某个阶段和某个方面的问题,但五种方法组合在一起却构成了一个比较完整的科学方法体系。它们各自有自己的方法生态位,但又构成一个比较完备和独立的方法生态系统。这些复杂性方法体系为我们解释复杂组织的生命过程和系统结构提供了具有深厚科学基础的分析方法。

四、复杂性方法的运用要点

我们已经系统挖掘了复杂性科学五个学科分支所蕴含的五种科学方法,在这里对其运用要点做一简要的总结,以便我们可以更一目了然地整体把握复杂性方法的精髓。

涌现生成方法是探讨系统从无到有的涌现、诞生过程的方法,它从生成主体、非线性相互作用、受限生成、自组织和环境策略等五个方面科学解释了复杂组织涌现生成的条件。这种方法的应用首先要有系统涌现生成的种子,霍兰称之为主体,这也表明涌现生成不是完全的从无到有的过程,而是从有到有。主体是一切涌现生成现象发生的始基或种子,是涌现生成的首要条件。其次,诸多主体之间要能相互作用,产生功能耦合,非线性相互作用是涌现产生的基本条件。第三,主体间的相互作用受到系统内在规则约束,是一个受限生成过程。第四,功能耦合和受限生成都不是在外力的作用下被迫进行的,而是一种自组织过程。最后,涌现生成系统具有适应和学习能力,能够应变复杂多变的环境。

适应维生方法是探讨组织诞生之后如何面对复杂多变的内外环境,并维持系统稳定而不被破坏瓦解的科学方法。它通过主体间的适应性来分析稳定性,并通过单个主体的规则选择和多个主体之间的学习、应变来达到复杂系统的适应和维生。首先,适应性主体的存在是一切适应行为产生的前提,适应性主体具有四种特性和三种机制,具有良好的环境适应和学习能力。其次,从单个主体面对既有的单个规则如何运作,到多条规则时如何选择,并揭示这些规则如何发生等三个层面揭示单主体的适应行为。最后,通过回声模型揭示多个主体相互作用下的维生机制。适应维生方法表明内稳定态是复杂系统存在的前提。

遗传进化方法是探讨组织诞生并稳定下来之后如何通过选择、交换、变异等手段来让组织不断生长、发展的一种科学方法。它根据组织的内外在条件,通过遗传复制来继承组织系统原有的优势,又通过交换和变异等手段来突破原有的限制而推陈出新,在继承和创新中实现进化、生长和发展。因此遗传进化方法的应用主要分为三步:首先是选择继承:继承是一切发展的基础和平台,选择优秀的种子并让它得到继承且发扬光大,因此第一步就是要确定遗传机制,揭示组织传承的微观过程。其次是综合创新:在继承的基础上必须要有突破和创新。创新的手段有两种,其中大部分创新都是利用原有的东西进行交叉,让来自父本和母本的不同基因的不同基因进行相互交换,通过优势互补而形成杂交优势。第三,原始创新:在现有基因的基础上进行变异,对原有的东西进行突破;通过变异而产生新的组织形式,新事物的产生往往就是通过变异而产生的。

临界突变方法是对组织系统在某种条件下发生暴风骤雨式的突变行为的一种特殊发展方式的刻画,是对复杂组织突变机制分析的一种科学新方法。组织发展既有阳光明媚的时期,也有风云突变的时刻,遗传进化方法描述了前一种情形,临界突变方法刻画了后一种情形。运用临界突变方法首先要判断组织系统状态是否处于临界边缘,只有处于临界边缘的系统才能发生雪崩突变行为。其次,系统一旦达到临界状态,就会通过连锁反应而发生雪崩,并出现时间和空间的无标度性,也就是判断有些宏观参数在统计学

上呈现幂次规律。第三,利用雪崩动力学对临界边缘发生的雪崩行为进行数学刻画,尽量建立雪崩方程。最后运用自组织分析方法对临界边缘上的雪崩突变行为进行动力机制分析。

复杂网络方法是用网络的观点和方法认识并分析复杂世界的一种科学新方法。茫茫世界,纷繁复杂,但我们只要找到合适的观测角度和方法就会发现世界其实并不大,认识也并不复杂,复杂网络方法正提供了这样一种观测复杂世界的可行方法。运用复杂网络方法,首先就要将问题转换为节点、连线等复杂网络语言,其次用平均路径长度、聚集系数、度分布等刻画复杂网络的参数来分析其统计特征,然后根据复杂网络的统计特征参数来判断是否出现小世界效应和无标度特征。复杂网络方法从统计视角对由千千万万要素构成的系统进行结构分析,是观察和刻画复杂世界的一种有力工具。

五、复杂性方法的基本特性

复杂性方法虽然由多种具体的方法构成,并各自具有自身的特性和适用范围,但它们也有一些共同的重要特点,归结起来,大致有互补性、关联性、非线性、自组织性、动态性等特性。

(一)互补性

复杂性科学的一个总特点就是对传统还原论持批判的态度,提出超越还原论的研究纲领。这里所谓的超越还原论是指既要还原论,但又不仅仅局限于还原论,而是必须要用整体论来补充还原论的不足,这就是笔者所说的复杂性科学的融贯方法论。[①] 复杂性方法继承了复杂性科学的这个特点,这些方法都具有互补性。任何科学都离不开还原论,复杂性方法也有还原分析的过程,例如涌现生成方法和适应维生方法中,我们都要找到适应性主体,在遗传进化方法中更深入到染色体层次。在这些深入分析的过程中,没有还原论是不可能做到的。但是仅有还原论似乎又不可能解释涌

①黄欣荣.复杂性科学的融贯方法论[J].科学技术哲学研究,2010(1):27-32.

现、适应、进化、雪崩、小世界等这些复杂行为，为此要引入整体论，利用整体论的优势弥补还原论的不足。例如，涌现的过程其实是具有主动性的主体相互作用、受限生成的过程。它与传统的向下因果不同，是一种向上因果的过程，是一个要素整合的过程。在适应维生和遗传进化中，也强调整体，强调整体的适应和进化。在临界雪崩和复杂网络方法中，我们更强调宏观整体，它们放弃跟踪个体的运行轨迹，改用统计的方法来把握群体的宏观统计规律，因此它们都强调了整体、全局的观点，从宏观整体去把握规律，发现了隐藏其中的无标度规律。由此可见，复杂性方法虽然各具特色，但它们都强调还原论与整体论的互补，都体现出互补思维和互补方法。如果说人类早期的整体性思维和方法是正题，近现代科学的分析性思维和方法是反题，那么如今的复杂性思维则是黑格尔所说的合题了，它试图综合前面两者的长处，克服它们的缺点。

（二）关联性

这里的关联性其实就是相互作用，复杂性方法都强调系统内各要素间相互作用以及系统与其环境之间的相互作用。离开相互作用，复杂性方法将寸步难行，甚至不复存在。可以说，没有系统内各要素以及系统与环境的相互作用的存在，就没有复杂性方法。在涌现生成方法中，生成主体间必须要有相互作用，涌现本身就是指系统由于内部组分的微观相互作用而出现的新的宏观结构和功能。正是相互作用把作为种子的主体重新排列组合，出现各种难于预测的涌现现象。在适应维生方法中，主体之间按照条件交换、交配和复制等控制条件进行进攻、防御和粘着，从而实现主体间的相互作用。复杂适应系统理论中的回声模型其实就是主体间相互作用模型。正是主体间的相互作用而产生了适应行为，没有相互作用就没有系统的适应性。在遗传进化方法中，染色体间的交叉重组其实就是相互交换染色体的过程，相互作用已经渗透到了微观的染色体层次。在临界突变方法中，处于临界状态的系统之所以会发生雪崩，就是由于偶然的变化因要素之间的相互作用而不断被放大，也就是相互作用而导致了连锁反应，最后发生灾难性的雪崩行为。在复杂网络方法中，构成复杂网络的大量节点通过边

线连接在一起，而这个节点间的连边其实就是相互作用的图形标识，正是不断发生相互作用而导致了小世界效应和无标度行为。大量的节点如果没有关联性，那只是孤立的节点，不可能产生任何的群体效应。

（三）非线性

在复杂系统中，大量的要素聚集在一起而产生多种多样的相互作用。相互作用大致可分为线性相互作用和非线性相互作用。线性相互作用是一种平庸的行为，其实也就是一是一，二是二，是典型的有一说一，不可能产生复杂的行为。而非线性就有可能产生分叉、突变、时滞、路径依赖、多吸引子、自激、自组织等不平庸的行为，一加一不一定等于二。① 其实复杂性之所以会产生，就是因为系统要素之间、系统与环境之间存在复杂的相互作用，也就是说非线性带来了各种不可预测的行为产生，从而带来的复杂性。例如涌现现象之所以产生，是因为主体之间的非线性相互作用，或者说非线性相互作用是涌现现象产生的根本原因，因此涌现性本质上是非线性的，它们都来源于非线性。适应行为和进化行为也是因为非线性相互作用而导致的，因为非线性而带来了不可预测的多样性，因此产生了适应性、新颖性、创新性。在临界雪崩行为中，微小的扰动之所以被连锁放大，就是因为系统的非线性存在，只有非线性才会产生放大作用，才能将微小的扰动无限放大而产生雪崩。在复杂网络的小世界构造中，随机化重连是一种非线性。而在无标度网络的构造中，优先连接是一种马太效应，是一种非线性放大行为。因此无论是小世界效应的出现，还是无标度特性的产生，都是因为复杂网络存在大量非线性相互作用的结果。

（四）自组织

所谓自组织就是不依赖于外力的作用而是靠自身的力量将要素组织起来并产生各种复杂行为。在复杂系统中，引起系统状态

①苗东升. 系统科学精要[M]. 北京：中国人民大学出版社，2006：119-120.

变化的根本原因都是自组织。复杂系统虽然都是开放系统，与外界环境紧密相联，但复杂性之所以产生，是因为系统内部的自组织，而并非外力引起。复杂系统自组织的产生是因为复杂系统存在大量的非线性相互作用，因此微小的原因可以通过非线性不断放大，微小的作用就在这非线性相互作用中被传递，要素间也通过相互作用而自行组织起来。复杂系统有一个特点，其要素往往都具有主动性，这样就给系统注入了活力的源泉，这种活力再经过相互作用而遍及整个系统。自组织是所有复杂系统引起各种复杂行为的根本动力，因此自组织是所有复杂系统的动力来源。在涌现生成过程中，自组织扮演了十分重要的角色，它是涌现生成的动力机制。涌现之所以产生，靠的就是复杂系统能够自组织，系统在自组织的作用下产生人们不可预测的各种行为。在复杂适应系统中，主体因果规则的产生和选择，主体间的进攻、防御和黏着等行为都不是人工操控的，完全靠系统的自组织去完成。在遗传进化过程中，也没有过多的人为干预，基因的复制、交换和变异都是系统在自组织的作用下完成的。在临界雪崩中，系统走向临界状态和最后发生雪崩都是依靠系统的自组织进行的，自组织是临界边缘发生雪崩突变的根本动力。正是自组织在临界雪崩中起着举足轻重的作用，所以巴克把其理论命名为自组织临界性理论，可见离开自组织就不可能发生临界现象，更不会发生灾难性的雪崩。

(五)动态性

牛顿科学中，时间是一个外在的参数，过去与未来没有区别，而复杂性科学强调系统发生、发展的过程，强调系统的生成演化。因此，牛顿科学善于处理无机自然界的各种现象和规律，而复杂性科学在处理有机世界的各种现象和规律中大显身手。在复杂系统中，时间是一个重要的参数，复杂系统往往具有路径依赖性，因此重视演化、重视演化过程中那些不同的分叉点、方向和路径，正因如此复杂系统才涌现和演化出丰富多彩的万千世界。复杂性科学目前比较成熟的五种理论中，四种都是刻画系统生命周期中的不同阶段的理论，都是复杂系统生成演化过程的描述。我们已经说过，涌现是对系统最初诞生阶段的刻画，复杂适应系统理论是对组

织诞生之后维稳持存阶段的刻画,遗传算法理论是对系统进化、生长阶段的刻画,而自组织临界性是对系统急剧突变时期状态变化的刻画。即使是复杂网络理论,也强调了网络系统的生成演化。因此,由复杂性的各种理论提炼出来的复杂性方法都强调了系统的生成演化观,是一个跟时间参数密切相关的动态过程分析,因此都具有动态性特征。

后　记

经过三年多的艰苦研究，作为国家社科基金课题和教育部人文社会科学规划项目的这个科研项目终于完成了。记得三年多前刚刚获得批准时的激动以及随后三年多的思考和写作，漫长的一千多个日日夜夜，真不容易。

这个课题是我博士论文研究的延续。我在清华大学跟随科技与社会研究中心的吴彤老师选择了复杂性科学方法论为方向来做博士论文，当时自己雄心勃勃，希望能够把复杂性方法论的问题做得比较彻底。然而，随着研究的深入，发现问题并不那么简单。首先，复杂性科学刚刚兴起，其学科范围和研究内容等学科的基本特性尚不很清晰，因此带来了研究对象的模糊性；其次，复杂性科学方法论问题其实包括哲学方法论、学科自身的研究方法以及该学科对其他学科的方法意义等三个层面的不同问题，因此问题本身并不那么简单；最后，博士论文写作时间短暂，于是在完成哲学方法论和学科自身的研究方法两部分后，只好忍痛放弃复杂性的科学方法意蕴的挖掘，匆匆结束论文，因此留下了遗憾。随着课题的完成，我的复杂性科学方法论研究三部曲终于能够比较圆满地告一段落。我把复杂性科学看做是系统科学“老三论”“新三论”的延续，是系统科学发展的第三阶段。“老三论”的科学方法论研究是由清华大学魏宏森老先生完成的，“新三论”的科学方法论研究是由我的博士生导师、清华大学吴彤教授完成的，我为能延续两位老师的研究事业来完成作为系统科学发展第三阶段的复杂性科学方法论而感到特别的荣幸。

本课题的研究主要做了如下几个事情:第一,比较系统地梳理了复杂性科学的来龙去脉和复杂性科学各分支的主要内容。复杂性科学由于学科发展还比较短暂,是一个尚在发展中的学科群,并具有学科界限的模糊性和学科内容的不确定性,于是让人不由生出复杂性科学真复杂的感叹。对一个正在发展中的学科群要探索其对其他学科的方法启示,首先就要梳理其自身的结构和内容,但目前这项工作见仁见智,于是我只好自己根据其他学者的研究成果去梳理出一个头绪,以便挖掘其方法意义。这是一项基础性的工作,但限于时间和能力,各个学科分支的发展历史及其主要内容只能借鉴其他学者的成果,我的工作无非就是把前人的研究成果梳理出条理并组合成一个学科体系,在此我要特别说明并对他们的工作表示充分的肯定和感谢。第二,系统挖掘了复杂性科学各学科分支的科学方法意义。任何学科的发展对其他学科都有一定的方法论意义,系统科学的科学方法更是已经成为比较公认的科学新方法。作为系统科学发展新阶段的复杂性科学继承了系统科学的传统,具有强烈的科学方法的借鉴意义,对其他学科有很好的借鉴作用。如今不少各界学者都在应用复杂性方法来解决传统方法难于解决的问题。但是,由于复杂性科学刚刚兴起,复杂性方法本身还没有人做深入的挖掘,于是造成了应用复杂性方法的困难。本研究重点就是在理清复杂性学科构成的基础上,重点挖掘、提炼出复杂性科学各分支学科的科学方法意义,以便其他学科能更方便应用。第三,将复杂性科学方法组合成一个解释复杂组织生成演化的方法体系。由于复杂性科学并不是一门学科,而是一个学科群,因此从各个学科分支提炼出来的科学方法之间是一个什么样的关系呢?本研究把它们按照解释复杂组织生成演化各个阶段的顺序来进行了逻辑重构,把它们都纳入到一个逻辑体系当中,让它们各自占有不同的科学方法生态位,并形成一个既独立又完备的科学方法体系。这些工作做得是否到位,这只能由读者去评判,并对不到位的地方作出更出色的补充了。

本研究历时三年多,之所以会这么长的时间,也有几个方面的原因。复杂性科学作为自然科学的最前沿研究之一,本身就很复杂,要系统挖掘提炼出对其他研究有启发的科学方法,更是一项艰

难的工作。我们原来的课题组成员由于大部分没有自然科学的知识背景，难于胜任原计划的研究工作，于是全部工作只好由本人独自承担，成为一个真正的独行侠。期间笔者还承担了各种行政事务，并在博士后流动站完成了应用经济学专业的博士后研究，写作了二十多万字的产业生态理论的博士后研究报告。忙忙碌碌中不知不觉就三年有余，让人不自觉感叹逝者如斯夫！

在课题完成的时候，我要对资助、支持和帮助过我的各单位和个人表示衷心的感谢。首先我要由衷感谢国家社科基金委员会和教育部社科司给与我课题和经费的资助和支持。博士毕业之后，一直惦记着复杂性科学方法研究这个课题，于是下决心以此问题来申报国家社科基金课题。可惜第一年申报终审未获通过，于是转而申报教育部人文社科基金并获得资助，第二年又将课题改进之后再次申报国家社科基金课题，并获批准。有了这些课题的资助和支持，本研究就有了经费的保障，并让我必须用心去完成。有时候研究工作也需要一定的压力和动力，完成这些课题自然成了我最近几年的压力和动力，日日夜夜想着的几乎都是课题的事情。正是有了这些课题的支持和动力，我才比较好地完成了复杂性科学方法的研究，并构成了复杂性科学方法论研究的三部曲，完成了自己的一桩心愿。

任何研究都是他人工作的继承和延续，牛顿这样的伟人都说他是站在巨人的肩膀上，我等凡人更是如此。本研究只是在前人研究的基础上向前推进了一小步而已，离开其他学者的工作，我将寸步难行。在本课题的研究中，为了比较完整地展现复杂性科学的各个学科分支，我综述了各学科的研究历程和主要内容。作为个人，我不可能从原始文献中去再做一遍研究和综述，于是我在其他学者研究的基础上引用了他们的研究成果，而且为了表述更准确而不至于给读者带来错误的科学知识，我在许多地方都采取直接引用的办法。因此可以说，本研究课题虽然表面上主要是由我完成的，但实际上是我与这些学者们共同劳动的结晶。虽然没有出现在研究成员之中，但他们的工作是我研究的基础，可以说他们是实际研究的参与者。因此我要特别感谢这些复杂性科学的同行们，是他们的艰苦工作成就了我这项研究。如果说有一点点贡献

的话，我主要是站在他们研究的基础上，做了方法论的挖掘和总结，并将它们纳入到一个比较完整的科学方法体系中。我虽然在引用之处标明了文献出处，但由于写作时间历时太长，难免有些文献因没有及时标注而有所遗漏，在此我请求他们原谅并指证。

我还要感谢清华大学科学与社会研究中心的老师们。读博期间，我从老师们那里学到了作为一个学者应该具备的能力和修养，更让我学会了如何做人做事。研究中心一直重视系统科学方法论的研究，就像前面所说，魏宏森教授完成了“老三论”的方法论研究，吴彤教授完成了“新三论”的方法论研究，我正是沿着老师们的足迹选择了复杂性科学方法论的研究。博士毕业后，老师们一如既往地给予我多方鼓励和支持，特别是曾国屏、吴彤老师给予我许多直接的指导和帮助，魏宏森老师把自己珍藏的图书赠送与我，并给予后辈鼓励，在此我对研究中心的老师们表示衷心的感谢！

我要感谢金吾伦、颜泽贤、苗东升等老师们，他们经常鼓励我将复杂性科学方法论研究坚持下去。金老师是我特别尊敬的长辈，其所做的复杂性哲学研究特别是生成论研究给我启示颇多，并为我奠定了重要的基础工作。金老师是本课题的主要成员之一，他为本课题成功立项做了重要贡献。但考虑到他年事已高且工作繁忙，故不敢烦扰先生帮后辈做具体的研究工作，但他一直鼓励我坚持这项研究，在此特别感谢。颜泽贤先生对复杂性哲学喜爱有加，多次邀请我参加其研究团队，共同来研究复杂性哲学问题，让我特别感激。苗东升老师一直鼓励着我，而且我比较多地直接引用了他的复杂性哲学研究成果。我的朋友范冬萍教授一直对我的研究极为关心和鼓励，她是我进行复杂性哲学研究的坚定支持者。重庆大学出版社的雷少波先生对我的复杂性方法论研究给予了充分的肯定，并将我的相关研究成果列入“万卷方法丛书”中出版，这是对我学术研究的最大支持。责任编辑李桂英付出了辛勤劳动，特此致谢。

江西财经大学的校领导、科研处领导和老师们在课题申报、项目管理过程中，给我许多鼓励和支持。特别是党委书记廖进球教授，作为我的博士后合作导师，催促我尽快完成博士后工作以便腾出时间及时完成该课题，提醒我们申报不易完成更难，要做好艰苦

努力的准备。科研处的严武处长和刘满凤、李志强副处长以及郑淑娟老师给予我多方的便利和帮助。我所在的马克思主义学院的领导和同事们从工作分配上给予了多方的照顾，让我少承担了一些教学、行政事务。课题组的成员们由于各方面的原因没有参加实际的研究工作，但给予了情感和精神上的相互鼓励。感谢王耀德教授对我一如既往的支持和帮助。本书的出版还得到了江西财经大学学术出版基金的全额资助。

国家社科基金项目的五位匿名评委对该研究进行了认真的审阅，在充分肯定的同时也提出了不少具体的修改意见。我们吸取了专家们的意见，并进行了认真的修改。在此对五位专家表示衷心的感谢。

最后，我要感谢我的家人。由于近年来忙于博士后研究和本课题的研究，料理家务、关照父母和教育小孩等事情基本上无暇顾及，给妻子带来了沉重的家务负担。在此，我要对父母、妻子和孩子道一声谢谢，是他们的强力支持才让我有心去完成这些艰难的工作。

参考文献

[1] Bak Per, Tang Chao, Wiesenfeld. *Self-organized criticality: an explanation of* 1/f *noise*[J]. Phisical Review Letters, 1987, 59(4): 381-384.

[2] Barabasi A L & Albert R. *Emergence of scaling in random networks*[J]. Science, 1999(286): 509-512.

[3] Christensen K, N R. Moloney. *Complexity and Criticality*[M]. London: Imperial College Press, 2005. Forward.

[4] Cilliers P. *Complexity and Postmodernism*[M]. New York: Routledge, 1998.

[5] Cowan G A & al, *Complexity: Metaphors, Models and Reality*[M]. MA: Addison-Wesley. 1994.

[6] Denise Najmanovich. *From Paradigms to Figures of Thought*[J]. Emergence, vol. 4, 2002(1/2): 85-93.

[7] Dent E B. *Complexity Science: a Worldview Shift*[J]. Emergence, 1999(1).

[8] Drossel B, Scwhabl F. *Self-organized Critical Forest fire Model*[J]. Phys Rev Lett, 1992, 69: 1629-1992.

[9] Gokug Morcol. *What is Complexity? Post-modernist or Positivist?*[J]. Emergence, 3(1): 104-119.

[10] Holland J H. *Adption in natural and artificial systems*[M]. Boston: MIT Press, 1992.

[11] Holland J H. *Emergence: From Chaos to Order*[M]. New York:

Helix Books,1998.

[12] Hans-Henrik Stølum. *Fluctuations at the self-organized critical states*[J]. Physical Review E 1997,56(6):6710-6718.

[13] Kaffman S A. *The Origins of Order—Self-Organization and Selection in Evolution*[M]. Oxford:Oxford University Press,1993.

[14] Kaffman S A. *At Home in the Universe*[M]. London:Oxford University Press,1995.

[15] Mario Bunge,*Emergence and Convergence*[M]. University of Toronto press. 2003:14-15.

[16] PerBak,ChaoTang,and Kurt Wiesenfeld. *Self-organized criticality:an explanation of 1/f noise*[J]. Physical Review Letters. 1987,59(4):381-384.

[17] Albert R&Barabasi A. *Statistical Mechanics of Complex Networks*[J]. Reviews of Modern Physics,Vol 74,Jan. 2002.

[18] Albert R&Barabasi A. *Statistical Mechanics of Complex Networks*[J]. Reviews of Modern Physics,Vol 74,Jan. 2002.

[19] Watts D J&Strogatz,S. H.,*Collective dynamics of small-world networks*[M]. Nature,1998,393:440-442.

[20] Weaver W. *Science and Complexity*[J]. Scientist,1948,36(4):536-544.

[21] 艾什比. 控制论导论[M]. 北京:科学出版社,1965.

[22] 保罗·西利亚斯. 复杂性与后现代主义[M]. 上海:上海科技教育出版社,2006.

[23] 邦格. 科学的唯物主义[M]. 上海:上海译文出版社,1989.

[24] 贝塔朗菲. 一般系统论[M]. 魏宏森,等,译. 北京:清华大学出版社,1987.

[25] 陈一壮. 复杂性理论:学方法的第三个梯级[N]. 学习时报,2005-07-04.

[26] 陈一壮. 埃德加·莫兰复杂性思想述评[M]. 长沙:中南大学出版社,2007.

[27] 陈禹,钟佳桂. 系统科学与方法概论[M]. 北京:中国人民大学出版社,2000.

[28] 陈禹. 复杂适应系统理论及其应用[M]//许国志. 系统科学. 上海:上海科技教育出版社,2000.
[29] 邓肯·J. 瓦茨. 小小世界——有序与无序之间的网络动力学[M]. 北京:中国人民大学出版社,2006.
[30] 范冬萍. 复杂系统的突现与层次[Z]. 复杂性科学哲学与感知控制论 2006 年国际研讨会论文集. 2006 年 7 月,广州.
[31] 范冬萍. 突现理论:历史与前沿[J]. 自然辩证法研究,2005(6).
[32] 范冬萍. 突现论的类型及其理论诉求[J]. 科学技术与辩证法,2005(4).
[33] 方锦清. 令人关注的复杂性科学和复杂性科学[J]. 自然杂志,24(1).
[34] 高召宁. 自组织临界性、分形及灾变理论研究[M]//西南交通大学博士学位论文,2008.
[35] 关筱霞. 扔出小鸟——混沌边缘的经济学[M]. 重庆:重庆出版社,2005.
[36] 郭元林. 复杂性科学知识论[D]. 中国社会科学院博士学位论文,2003.
[37] 哈肯. 协同学[M]. 上海:上海译文出版社,1988.
[38] 哈肯. 大脑工作原理[M],郭治安,等,译. 上海:上海科技教育出版社,2000.
[39] 郝柏林. 复杂性的刻画与复杂性科学[J]. 科学,1999,51(3):3-8.
[40] 黄欣荣,等. 圣菲研究所:一种科研新体制[J]. 科学学与科学技术管理,2004(4).
[41] 黄欣荣. 复杂性科学的融贯方法论[J]. 科学技术哲学研究,2010(1).
[42] 黄欣荣. 复杂性范式的兴起与科学世界观的变革[J]. 河北师大学报:社科版,2009(3).
[43] 黄欣荣. 复杂性科学与哲学[M]. 北京:中央编译出版社,2007.
[44] 黄欣荣. 复杂性科学的方法论研究[M]. 重庆:重庆大学出版

社,2006.

[45] 金观涛,华国凡. 控制论与科学方法论[M]. 北京:新星出版社,2005.

[46] 金观涛. 系统的哲学[M]. 北京:新星出版社,2006.

[47] 金观涛. 整体的哲学——组织的起源、生长和演化[M]. 成都:四川人民出版社,1987.

[48] 金吾伦. 生成哲学[M]. 保定:河北大学出版社,2000.

[49] 卡斯蒂. 虚实世界[M]. 上海:上海科技教育出版社,1998.

[50] 李建会. 生命和计算:人工生命的生命观研究[D]. 北京大学博士学位论文,2002.

[51] 李士勇. 非线性科学与复杂性科学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.

[52] 李仕雄. 沙堆演化动态特性及自组织临界现象研究[D]. 西南交通大学博士学位论文,2004.

[53] 李炜. 演化中的标度行为和雪崩动力学[D]. 华中师范大学博士学位论文,2001.

[54] 刘军. 社会网络分析导论[M]. 北京:社会科学文献出版社,2004.

[55] 刘劲杨. 哲学视野中的复杂性[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,2008.

[56] 刘涛,等. 复杂网络理论及其应用研究概述[J]. 系统工程,2005(6).

[57] 马克・查布纳. 临界——为什么世界比我们想像的要简单[M]. 刘杨,陈雄飞,译. 长春:吉林人民出版社,2001.

[58] 梅可玉. 论自组织的临界性与复杂系统的演化行为[J]. 系统辩证学学报,2004(4).

[59] 米歇尔・沃尔德罗普. 复杂——诞生于秩序与混沌边缘的科学[M]. 北京:三联书店,1997.

[60] 马红霞,钱兆华. 20 世纪系统思想发展的回顾[J]. 系统辩证学学报,2003(1).

[61] 苗东升. 复杂性研究的现状与展望[M]. 系统辩证学学报,2001(4).

[62] 苗东升. 论系统思维(三)[J]. 系统辩证学学报,2005(1).
[63] 苗东升. 论涌现[J]. 河池学院学报,2008(1).
[64] 苗东升. 系统科学精要(第二版)[M]. 北京:中国人民大学出版社,2006.
[65] 苗东升. 科学的转型:从简单性科学到复杂性科学[J]. 河北学刊,2004(6).
[66] 闵家胤."复杂性研究"和"复杂性科学"[M]. 哲学动态,2003(3).
[67] 莫兰. 复杂思想:自觉的科学[M]. 陈一壮,译. 北京:北京大学出版社,2001.
[68] 默顿. 科学社会学[M]. 北京:商务印书馆,2003.
[69] 巴克. 大自然如何工作[M]. 李炜,蔡勖,译. 武汉:华中师范大学出版社,2001.
[70] 潘贵军. 自组织临界性与复杂网络的若干问题研究[D]. 华中科技大学博士学位论文,2006.
[71] 齐曼. 真学科[M]. 上海:上海科技教育出版社,2002.
[72] 邱仁宗. 科学方法和科学动力学(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
[73] 钱学森. 论系统工程[C]. 长沙:湖南科学技术出版社,1988.
[74] 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志,1990(1).
[75] 饶彬. 复杂系统的自组织临界性[D]. 国防科技大学硕士论文,2005.
[76] 任锦鸾. 创新机理:基于复杂性科学的视角[M]. 北京:科学出版社,2009.
[77] 司马贺. 人工科学——复杂性科学面面观[M]. 上海:上海科技教育出版社,2004.
[78] 斯泰西. 组织中的复杂性与创造性[M]. 成都:四川人民出版社,2000.
[79] 孙小礼. 科学方法中的十大关系[M]. 上海:学林出版社,2004.
[80] 涂序彦,等. 人工生命及应用[Z]. 北京:北京邮电大学出版

社,2004.
[81] 托马斯·库恩. 科学革命的结构[M]. 金吾伦,胡新和,译. 北京:北京大学出版社,2003.
[82] 汪小凡,等. 复杂网络理论与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
[83] 王林,戴冠中. 复杂网络的度分布研究[J]. 西北工业大学学报,2006(4).
[84] 王小平,曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2004.
[85] 魏宏森. 系统科学方法论导论[M]. 北京:人民出版社,1983.
[86] 魏宏森. 复杂性研究与系统思维方式[J]. 系统辩证学学报,2003(1).
[87] 维纳. 控制论[M]. 北京:北京大学出版社,2007.
[88] 吴彤. 复杂网络研究及其意义[M]. 哲学研究,2004(8).
[89] 吴彤. 复杂性的科学哲学探究[M]. 呼和浩特:内蒙古人民出版社,2008.
[90] 吴彤. 复杂性范式的兴起[J]. 科学技术与辩证法,2001(6):20-24.
[91] 吴彤. "复杂性"研究的若干哲学问题[J]. 自然辩证法研究,2000(1).
[92] 吴彤. 自组织方法论研究[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
[93] 吴彤. 科学哲学视野中的客观复杂性[J]. 系统辩证学学报,2001(4).
[94] 西利亚斯:复杂性与后现代主义[M]. 曾国屏,译. 上海:上海科技出版社,2006.
[95] 谢爱华. 突现论中的哲学问题[M]. 北京:中央民族大学出版社,2006.
[96] 谢金星. 进化计算简要综述[J]. 控制与决策,1997(1).
[97] 许国志. 系统科学[C]. 上海:上海科技教育出版社,2000.
[98] 薛惠锋. 复杂性人工生命研究方法导论[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
[99] 颜泽贤,范冬萍,张华夏. 系统科学导论——复杂性探索[M].

北京:人民出版社,2006.
[100] 伊查克·爱迪思. 企业生命周期[M]. 北京:华夏出版社,2004.
[101] 余有明、刘玉树. 进化计算的理论与算法[J]. 计算机应用研究,2005(9).
[102] 约翰·H. 霍兰. 隐秩序——适应性造就复杂性[M]. 上海:上海科技教育出版社,2000.
[103] 约翰·H. 霍兰. 涌现——从混沌到有序[M]. 上海:上海科技出版社,2001.
[104] 约翰·L. 卡斯蒂. 虚实世界[M]. 上海:上海科技教育出版社,1998.
[105] 约翰·霍根. 科学的终结[M]. 呼和浩特:远方出版社,1997.
[106] 约翰·斯科特. 社会网络分析法[M]. 刘军,译. 重庆:重庆大学出版社,2007.
[107] 詹姆斯·格莱克. 混沌[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
[108] 张世英. 新哲学讲演录[M]. 桂林:广西师范大学出版社,2004.
[109] 周涛,等. 复杂网络研究概述[J]. 物理,2005(1).
[110] 朱志昌. 当代西方系统运动[M]//许国志,等. 系统科学与工程研究. 上海:上海科学技术教育出版社,2000.

万卷方法总书目

万卷方法是我国第一套系统介绍社会科学研究方法的大型丛书，来自中国社科院、北京大学等研究机构和高校的两百余名学者参与了丛书的写作和翻译工作。至今已出版图书85多个品种，其中绝大多数是2008年以来出版的新书。

85 社会科学方法论（国家十二五规划教材）
978-7-5624-6204-0

84 田野工作的艺术
978-7-5624-6257-6

83 图解AMOS在学术研究中的应用
978-7-5624-6223-1

82 应用STATA做统计分析（更新至STATA10.0）
978-7-5624-4483-1

81 社会调查设计与数据分析——从立题到发表
978-7-5624-6074-9

80 质性研究导引
978-7-5624-6132-6

79 APA格式——国际社会科学学术写作规范手册
978-7-5624-6105-0

78 如何做心理学实验
978-7-5624-6151-7

77 话语分析导论
978-7-5624-6075-6

76 学位论文全程指导
978-7-5624-6113-5

75 心理学研究方法导论
978-7-5624-5828-9

74 分类数据分析
978-7-5624-6133-3

73 结构方程模型：AMOS的操作与应用（附光盘版）
978-7-5624-5720-6

72 AMOS与研究方法（第2版）
978-7-5624-5569-1

71 爱上统计学（第2版）
978-7-5624-5891-3

70 社会科学定量研究的变量类型、方法选择与范例解析
978-7-5624-5714-5

69 案例研究：设计与方法（中译第2版）
978-7-5624-5732-9

68 问卷设计手册：市场研究、民意调查、社会调查、健康调查指南
978-7-5624-5597-4

67 广义潜变量模型：多层次、纵贯性以及结构方程模型
978-7-5624-5393-2

66 调查问卷的设计与评估
978-7-5624-5153-2

65 心理学论文写作——基于APA格式的指导
978-7-5624-5354-3

64 心理学质性资料的分析
978-7-5624-5363-5

63 问卷统计分析实务：SPSS操作与应用
978-7-5624-5088-7

62 如何做综述性研究
978-7-5624-5375-8

61 质性访谈方法
978-7-5624-5307-9

60 量表编制：理论与应用（校订新译本）
978-7-5624-5285-0

59 质性研究：反思与评论（第2卷）
978-7-5624-5143-3

58 实验设计原理：社会科学理论验证的一种路径
978-7-5624-5187-7

57 混合方法论：定性研究与定量研究的结合
978-7-5624-5110-5

56 社会统计学

978-7-5624-5253-9

55 校长办公室的那个人(质性研究个案阅读)
978-7-5624-4880-8

54 泰利的街角(质性研究个案阅读)
978-7-5624-4937-9

53 客厅即工厂(质性研究个案阅读)
978-7-5624-4886-0

52 标准化调查访问
978-7-5624-5062-7

51 解释互动论
978-7-5624-4936-2

50 如何撰写研究计划书
978-7-5624-5087-0

49 质性研究的理论视角:一种反身性的方法论
978-7-5624-4889-1

48 社会评估:过程、方法与技术
978-7-5624-4975-1

47 如何解读统计图表
978-7-5624-4906-5

46 公共管理定量分析:方法与技术(第2版)
978-7-5624-3640-9

45 量化研究与统计方法
978-7-5624-4821-1

44 心理学研究要义
978-7-5624-5098-6

43 调查研究方法 (校订新译本)
978-7-5624-3289-0

42 分析社会情境:质性观察和分析方法
978-7-5624-4690-3

41 建构扎根理论:质性研究实践指南
978-7-5624-4747-4

40 参与观察法
978-7-5624-4616-3

39 文化研究:民族志方法与生活文化
978-7-5624-4698-9

38 质性研究方法:健康及相关专业研究指南
978-7-5624-4720-7

37 如何做质性研究
978-7-5624-4697-2

36 质性研究中的访谈:教育及社会科学研究者指南
978-7-5624-4679-8

35 案例研究方法的应用(中译第2版)
978-7-5624-3278-3

34 教育研究方法论探索
978-7-5624-4649-1

33 实用抽样方法
978-7-5624-4487-9

32 质性研究:反思与评论(第1卷)
978-7-5624-4462-6

31 社会科学研究的思维要素(第8版)
978-7-5624-4465-7

30 哲学史方法论十四讲
978-7-5624-4446-6

29 社会研究方法
978-7-5624-4456-5

28 质性资料的分析:方法与实践(第2版)
978-7-5624-4426-8

27 实用数据再分析法(第2版)
978-7-5624-4296-7

26 质性研究的伦理
978-7-5624-4304-9

25 叙事研究:阅读、倾听与理解
978-7-5624-4303-2

24 质化方法在教育研究中的应用(第2版)
978-7-5624-4349-0

23 复杂调查设计与分析的实用方法(第2版)
978-7-5624-4290-5

22 研究设计与写作指导:定性、定量与混合研究的路径
978-7-5624-3644-7

21 做自然主义研究:方法指南
978-7-5624-4259-2

20 多层次模型分析导论(第2版)
978-7-5624-4060-4

19 评估:方法与技术(第7版)
978-7-5624-3994-3

18 焦点团体:应用研究实践指南(第3版)
978-7-5624-3990-5

17 质的研究的设计:一种互动的取向 (第2版)

978-7-5624-3971-4

16 组织诊断:方法、模型和过程(第3版)
978-7-5624-3055-1

15 民族志:步步深入(第2版)
978-7-5624-3996-7

14 分组比较的统计分析(第2版)
978-7-5624-3942-4

13 抽样调查设计导论(第2版)
978-7-5624-3943-1

12 定性研究(第3卷):经验资料收集与分析的方法(2版)
978-7-5624-3944-8

11 定性研究(第4卷):解释、评估与描述(第2版)
978-7-5624-3948-6

10 定性研究(第1卷):方法论基础(第2版)
978-7-5624-3851-9

9 定性研究(第2卷):策略与艺术(第2版)
978-7-5624-3286-9

8 社会网络分析法(第2版)
978-7-5624-2147-4

7 公共政策内容分析方法:
978-7-5624-3850-2

6 复杂性科学的方法论研究
978-7-5624-3825-0

5 社会科学研究:方法评论
978-7-5624-3689-8

4 论教育科学:基于文化哲学的批判与建构
978-7-5624-3641-6

3 科学决策方法:从社会科学研究到政策分析
7-5624-3669-0

2 电话调查方法:抽样、筛选与监控(第2版)
7-5624-3441-7

1 研究设计与社会测量导引(第6版)
978-7-5624-3295-1

［Ｇｅｎｅｒａｌ Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
书名＝复杂性科学方法及其应用
作者＝黄欣荣著
页数＝２８２
ＳＳ号＝１２９１０４８８
出版日期＝２０１２．０１